



September 8 - 9, 2021

#EngineeringTomorrowsMaterials

Top topics

- Mercedes S-Class: polyamide structural element integrated in the front end
- VW ID3 tailgate: lightweight plastic construction with visible surface
- MAN high roof: FEM calculated and real crash undergone
- Ford front end: architecture optimization through functional integration
- AUDI interior: prediction of surface defects with metallic effect pigments
- Environment: recycling, sorting and processing of plastics

with friendly support of:



VDI-BERICHTE
Herausgeber:
VDI Wissensforum GmbH

Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter www.dnb.de abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek (German National Library)

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at www.dnb.de.

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2021

Alle Rechte vorbehalten, auch das des Nachdruckes, der Wiedergabe (Photokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, auszugsweise oder vollständig.

Der VDI-Bericht, der die Vorträge der Tagung enthält, erscheint als nichtredigierter Manuscriptdruck.

Die einzelnen Beiträge geben die auf persönlichen Erkenntnissen beruhenden Ansichten und Erfahrungen der jeweiligen Vortragenden bzw. Autoren wieder. Printed in Germany.

ISSN 0083-5560

ISBN 978-3-18-092385-7

Content/Inhalt

► Structural components/Strukturauteile

Development of an energy-absorbing structural element made of polyamide integrated in the plastic front-end carrier of the new Mercedes S-Class	1
<i>Entwicklung eines energieabsorbierenden Strukturelements aus Polyamid integriert im Kunststoff-Frontendträger der neuen Mercedes S-Klasse</i>	5
A. Wüst, BASF SE, Ludwigshafen;	
T. Metzner, Mercedes-Benz AG, Sindelfingen	
BAGS: Highly-integrated front-end module carrier	9
<i>BAGS: Hochintegrierter Front End Modulträger</i>	19
L. Reifenstein, B. Nießen, Ford Werke GmbH, Cologne	

► Surfaces/Oberflächen

Lightweight plastic construction with visible surface as exemplified by the Volkswagen ID.3 tailgate	29
<i>Kunststoffleichtbau mit Sichtoberfläche am Beispiel der Heckklappe Volkswagen ID.3</i>	39
P. Helmke, Volkswagen AG, Wolfsburg;	
B. Pfeiffer, Celanese GmbH, Sulzbach	
Breakthrough in producing soft and sustainable interior surfaces by injection moulding of TPE	49
T. Köppl, F. Dresel, N. Grohnmeier, HEXPOL TPE GmbH, Lichtenfels	

► Simulation

The all-new MAN high-roof cab – epoxy sandwich RTM – simulated using FEM and crashed under real conditions	61
<i>Epoxid-Sandwich-RTM – FEM gerechnet und real getestet</i>	75
A. Schmitz, MAN Truck & Bus SE, Munich	
Development and validation of a simulation methodology for the prediction of surface defects for plastic components with metallic effect pigments	89
<i>Entwicklung und Validierung einer Simulationsmethodik zur Vorhersage von Oberflächendefekten für Kunststoffbauteile mit metallischen Effektpigmenten</i>	101
Dr.-Ing. Daniel Kugele, Audi AG, Ingolstadt;	
Dr.-Ing. Sebastian Mönnich, PEG GmbH, Darmstadt;	
Cigdem Belgele M.Sc., Technische Universität Darmstadt	
The History of Integrative Simulation from Laboratories to all Designers' Desktops	113
S. Jana, F. Ehrhart, M. Bromberger, ALTAIR Engineering GmbH, Böblingen	

► Environment and Recycling/*Umwelt und Recycling*

Interior parts with a focus on climate – A pleasant feel thanks to thermoplastic foam.	129
<i>Interieurteile im Klimafokus – Angenehme Haptik durch thermoplastischen Schaum</i>	145
J. Horn, S. Pirl, GK Concept GmbH, Dresden;	
M. Gehringer, F. Förster, ALLOD Werkstoff GmbH & Co. KG, Burgbernheim	
Sorting technologies: the key to quality products in a circular economy	161
<i>Sortiertechnologien: Der Schlüssel für Qualitätsprodukte in der Kreislaufwirtschaft</i>	173
H. Lehmann, TOMRA Sorting GmbH, Mülheim-Kärlich	

► **Plastics for the new mobility/*Kunststoffe für die neue Mobilität***

Shaping the future of electromobility with holistic plastic solutions	185
<i>Mit gesamtheitlichen Kunststofflösungen die Zukunft der Elektromobilität gestalten.</i>	199
R. Holschuh, T. Bayerl, BASF SE, Ludwigshafen	

Polypropylene films and injection-molding resins for In-Mold Structural Electronics (IMSE®)	213
A. Keränen, T. Wuori, J. Asikkala, TactoTek Group, Oulu, Finland;	
E. Garcia Biosca, A. Benndorf, Repsol, Madrid, Spain	

► **Sustainable use of plastics/*Nachhaltiger Kunststoffeinsatz***

Lightweight TPE for weight-reduced automotive applications –	
Be Smart – Make it lightweight.	225
<i>Lightweight TPE für gewichtsreduzierte Automobilanwendungen –</i>	
<i>Be Smart – Make it lightweight.</i>	235
M. Hetterich, M. Michl, KRAIBURG TPE GmbH & Co KG, Waldkraiburg	

Sustainability: R-cycle and digital twin –	
An approach to a sustainable circular economy	245
<i>Nachhaltigkeit: R-Cycle und digitaler Zwilling –</i>	
<i>Lösungsansatz für eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft.</i>	249
T. Walther, ARBURG GmbH + Co. KG, Loßburg;	
B. Brenken, Reifenhäuser Group, Troisdorf	



INGENIEUR.de
TECHNIK - KARRIERE - NEWS

powered by VDI Verlag

Starten Sie durch –
auf INGENIEUR.de!

**Das TechnikKarriereNews-Portal für
Ingenieure und IT-Ingenieure.**

Was immer Sie für Ihre Karriere brauchen – Sie finden es auf ingenieur.de:
Auf Sie zugeschnittene Infos und Services, Stellenangebote in der Jobbörse,
Firmenprofile, Fachartikel, Gehaltstest, Bewerbungstipps, Newsletter und alles
zu den VDI Nachrichten Recruiting Tagen.

Development of an energy-absorbing structural element made of polyamide integrated in the plastic front-end carrier of the new Mercedes S-Class

Dipl.-Ing. **Andreas Wüst**, BASF SE, Ludwigshafen;
Dipl.-Ing. **Thomas Metzner**, Mercedes-Benz AG, Sindelfingen

Abstract

Body systems must satisfy numerous new requirements regarding safety and stability. With the new S-Class, this is achieved, among other things, with a crash-optimized front-end carrier made of short-glass-fiber-reinforced polyamide.

Optimization of the deformation zone at the front of the vehicle

A front-end carrier is responsible for the modular design of the front structure of a vehicle. At the same time, additional crash levels in the front-end carrier deliver a homogeneously large-area energy absorption and also an early energy absorption in the front of the car and significantly improve passive safety with regard to driver and passenger protection. One challenge is to create an equivalent risk of injury in the event of a crash of two vehicles of different weights, with differences in energy absorption for the occupants of the lighter vehicle.



Fig. 1: Crash situation

The integration of additional large-area crash levels with no hard structures creates an occupant-friendly deformation zone with uniform energy distribution throughout the front of the car. However, this shield of the entire front of the vehicle not only protects possible accident parties but also relieves own vehicle occupants, especially in unfavourable accident situations.

This significantly reduces the severity of accidents for the occupants, which further improves child safety in particular.

Glass-fiber-reinforced polyamide for crash absorbers

The innovation here is using crash-relevant components made of glass-fiber-reinforced polyamide.



Fig. 2: Polyamide crash absorber

Until now, energy-absorbing plastic components have not been able to meet crash requirements in the automotive industry because calculations involving complex load requirements could not deliver reliability. An additional challenge is to integrate an additional effective deformation zone into the tight installation space in the front of the car.

A cross-divisional development project involving Group Research, Passive Safety, Series Development Exterior, the Technology Factory and BASF SE as well as the system supplier HBPO GmbH was launched for tackling these tasks.

The FE software LS-Dyna® and the established Ultrasim® from BASF SE were used as the basis for the crash absorber calculations.

FE software LS-Dyna® with Ultrasim®

At its core, this method is based on the coupling of the FE software LS-Dyna® with Ultrasim®, a software tool developed by BASF for numerical mapping of complex non-linear material models. Ultrasim is able to take into account the properties characteristic of thermoplastic materials all in a single numerical approach. These include variables such as

- Anisotropy - induced by the use of fiber-filled materials
- Strain rate - important in the case of crash-loaded components
- Failure behavior - plastic is completely different from metals here
- Tension-compression asymmetry – in strength and in the event of failure

- Temperature - non-linear beyond the glass transition
- Moisture - especially in the case of PA-based materials

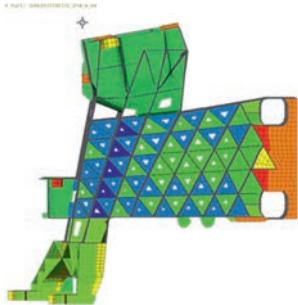


Fig. 3: The crash absorber FE model

The material models realized in Ultrasim have proven themselves in numerous component developments and even in the case of the present crash element allow the evaluation of robustness and controlled failure. In particular, prediction of the forces occurring in the crash element, the dissipated energy and the stresses acting on the residual structure are valuable findings that enable a simulative overall vehicle design using plastic elements. The simultaneous and coordinated use of Ultrasim is indispensable here for all parties involved in the development: OEM, Tier 1 and material supplier.

In addition to numerical mapping, the right choice of component geometry is an equally important aspect. Hardly any purely thermoplastic, short-fiber-reinforced component is designed in its main function for a controlled energy absorption. The design guidelines for this complex type of load were not only determined in preliminary studies at BASF and validated with component crash tests but also refined during the development of the first prototypes in order to optimize the crash elements for the tight installation space. In addition, manufacturability in the injection-molding process was always ensured by accompanying rheological filling studies.

Validation and implementation

With the subsequent real vehicle crash tests, the behavior of the simulatively pre-designed crash absorbers was fully confirmed.

A simple scalability of the required load and energy levels enables optimized, adapted use in a wide range of model series. It is also possible to take account of country-specific adjustments without any problems. For example, compatibility requirements on the part of Euro NCAP are fully integrated from 2020 into an existing component concept. The developed material models and calculation methods can also be applied in future to other load requirements in the vehicle (battery protection, for example).

All in all, this technology opens up a great potential regarding costs and lightweight construction and also significantly reduces development times. The introduction of the 'crash-optimized front-end carrier made of short-glass-fiber-reinforced polyamide' technology starts with the market launch of the new S-Class in 2020. This technology has been transferred to all subsequent C-Class and E-Class vehicles as well as the EQC platform.

Entwicklung eines energieabsorbierenden Strukturelements aus Polyamid integriert im Kunststoff-Frontendträger der neuen Mercedes S-Klasse

Dipl.-Ing. **Andreas Wüst**, BASF SE, Ludwigshafen;
Dipl.-Ing. **Thomas Metzner**, Mercedes-Benz AG, Sindelfingen

Kurzfassung

Karosseriesysteme müssen zahlreiche neue Anforderungen an Sicherheit und Stabilität erfüllen. Bei der neuen S-Klasse gelingt dies unter anderem mit einem crashoptimierten Frontendträger aus kurzglasfaserverstärktem Polyamid.

Optimierung Deformationszone in der Fahrzeugfront

Ein Frontendträger (FET) ist für den modularen Aufbau der Frontstruktur eines Fahrzeugs verantwortlich. Zugleich erzielen zusätzliche Crashebenen im FET eine homogen großflächige sowie frühzeitige Energieaufnahme im Vorderwagen und verbessern die passive Sicherheit bezüglich Eigen- und Partnerschutz signifikant.

Eine Herausforderung besteht darin, bei einem Crash zweier verschieden schwerer Fahrzeuge, mit Unterschieden bei der Energieabsorption für die Insassen des leichteren Fahrzeugs ein gleichwertiges Verletzungsrisiko zu realisieren.



Bild 1: Crashsituation

Durch die Integration zusätzlicher großflächiger Crashebenen ohne harte Strukturen entsteht eine partnerfreundliche Deformationszone mit gleichmäßiger Energieverteilung im gesamten Vorderwagen. Dieser Schutzschild der gesamten Fahrzeugfront schont aber nicht nur mögliche Unfallgegner, sondern entlastet auch die eigenen Fahrzeuginsassen besonders bei ungünstigen Unfallsituationen.

Dadurch wird die Unfallschwere für die Insassen deutlich reduziert, wodurch besonders die Kindersicherheit weiter verbessert wird.

Glasfaserverstärktes Polyamid für Crashabsorber

Die Innovation besteht darin, crashrelevante Bauteile aus glasfaserverstärktem Polyamid einzusetzen.



Bild 2: Polyamid Crashabsorber

Bisher konnten energieabsorbierende Kunststoffbauteile für Crashanforderungen nicht im Automobilbau zum Tragen kommen, da eine Berechnung mit komplexen Lastanforderungen nicht verlässlich möglich war. Eine zusätzliche Herausforderung besteht darin, in die angespannte Bauraumsituation im Vorderwagen eine zusätzliche effektive Deformationszone zu integrieren.

Für die Bearbeitung der gestellten Aufgaben wurde ein bereichsübergreifendes Entwicklungsprojekt mit Konzernforschung, passiver Sicherheit, Serienentwicklung Exterieur, Technologiefabrik und der BASF SE sowie dem Systemlieferanten Fa. HBPO GmbH ins Leben gerufen.

Als Basis für die Berechnung der Crashabsorber wurde die FE-Software LS-Dyna® und das etablierte Ultrasim® der BASF SE verwendet.

FE-Software LS-Dyna® mit Ultrasim®

Im Kern basiert diese Methode auf der Kopplung der FE-Software LS-Dyna® mit Ultrasim®, einem von der BASF entwickelten Software-Tool zur numerischen Abbildung komplexer nichtlinearer Materialmodelle. Ultrasim® ist in der Lage, die für thermoplastische Werkstoffe charakteristischen Eigenschaften allesamt in einem einzigen numerischen Ansatz zu berücksichtigen. Hierzu zählen Größen wie

- Anisotropie – induziert durch Verwendung fasergefüllter Werkstoffe
- Dehnrate - wichtig bei crashbelasteten Bauteilen

- Versagensverhalten – Kunststoff ist hier völlig anders als Metalle
- Zug-Druck Asymmetrie – in Festigkeit und beim Versagen
- Temperatur – nichtlinear über den Glasübergang
- Feuchte – insbesondere bei PA basierten Werkstoffen

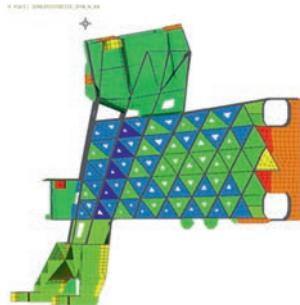


Bild 3: Darstellung FE-Modell des Crashabsorbers

Die in Ultrasim® realisierten Materialmodelle haben sich in zahlreichen Bauteilentwicklungen bewährt und gestatten auch beim vorliegenden Crashelement die Bewertung von Robustheit und kontrolliertem Versagen. Insbesondere die Vorhersage der auftretenden Kräfte im Crashelement, der dissipierten Energie und der auf die Reststruktur einwirkenden Belastungen sind wertvolle Erkenntnisse, die eine simulative Gesamtfahrzeugauslegung mit Kunststoffelementen ermöglichen. Unabdingbar ist hierbei die simultane und abgestimmte Verwendung von Ultrasim® bei allen an der Entwicklung beteiligten Parteien: OEM, Tier 1 und Materiallieferant.

Neben der numerischen Abbildung ist die richtige Wahl der Bauteilgeometrie ein ebenso wichtiger Aspekt. Kaum ein rein thermoplastisches, kurzfaserverstärktes Bauteil ist in der Hauptfunktion für eine kontrollierte Energieaufnahme ausgelegt. Die Gestaltungsrichtlinien für diese komplexe Art der Belastung wurden sowohl in Vorstudien bei der BASF ermittelt und mit Bauteil-Crashtests validiert als auch bei der Entwicklung erster Prototypen verfeinert, um die Crashelemente für den engen Bauraum zu optimieren. Daneben wurde durch begleitende rheologische Füllstudien stets die Herstellbarkeit im Spritzgussprozess sichergestellt.

Validierung und Umsetzung

Mit den nachfolgenden realen Fahrzeug Crashversuchen wurde das Verhalten der simulativ vorausgelegten Crashabsorber volumnäßig bestätigt.

Eine einfache Skalierbarkeit der benötigten Last- und Energieniveaus ermöglicht den optimiert angepassten Einsatz in verschiedenen Baureihen. Auch die Berücksichtigung von länderspezifischen Anpassungen ist problemlos möglich. Zum Beispiel wurden die Kompatibilitätsanforderungen durch Euro-NCAP ab 2020 vollumfänglich in ein bestehendes Bauteilkonzept integriert. Die entwickelten Materialmodelle und Berechnungsmethoden können zukünftig auch auf andere Lastanforderungen im Fahrzeug angewendet werden (z.B. Batterieschutz).

In Summe erschließt diese Technologie ein hohes Kosten- und Leichtbaupotenzial und reduziert ebenfalls deutliche die Entwicklungszeiten. Die Einführung der Technologie "crashoptimierter Frontendträger aus kurzglasfaserverstärktem Polyamid" wird mit der Markteinführung der neuen S-Klasse 2020 starten. In allen Folgefahrzeugen C-Klasse und E-Klasse sowie der EQC Plattform wurde diese Technologie übertragen.

BAGS: Highly-integrated front-end module carrier

Dipl.-Ing. **Lars Reifenstein**, Dipl.-Ing. **Bert Nießen**,
Ford Werke GmbH, Cologne

1. Abstract

Presentation of a highly integrated Front End Bolster Concept with an integrated Active Grille Shutter System (BAGS)

2. Agenda

- Predecessor platform situation
- Platform comparison C1 and C2
- Motivation for changing the front-end strategy
- Architecture development
- Further product and process optimizations
- Platform achievements
- Outlook

3. Predecessor platform situation

The foundation of the previous series was laid in 2003 with the development of the C1 platform, whose first derivative was the Focus C-Max. Here, a steel-plastic hybrid front-end carrier was used, which was mounted in the body shop. The lower cooling package carrier structure was a welded assembly that was screwed to the body along with the cooling package. With the Focus 2013 the active grille shutter system was introduced for the first time in large quantities at a vehicle manufacturer, which with the existing cooling package complexity resulted in high investment and part costs. The active grille shutter system was pre-assembled in different variants either on the cooling package or on the bumper. Sealing was often difficult because the grille shutter system had to be routed past the already mounted bumper cover.

During the redesign of the body shell structure and the cooling package architecture during the development of the C2 platform, the assembly problems were solved and further synergies achieved.

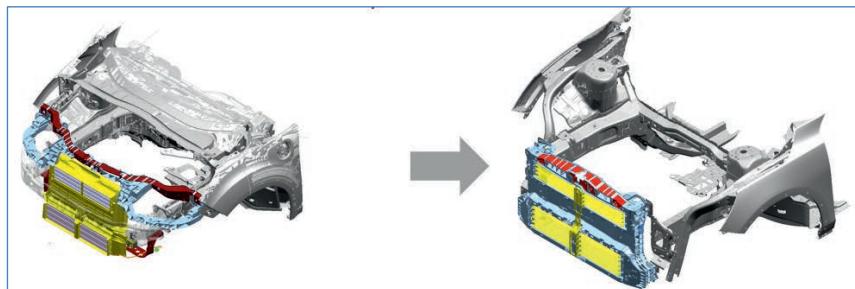


Fig. 1: Change from a multi-part assembly to a highly integrated front-end carrier system

4. Platform comparison C1 and C2

From the start the C1 platform was designed as a global platform, and the vehicles were manufactured in Europe, South America and Asia. From 2012 onwards, North American products such as the Focus or Escape were integrated into Alan Mulally's ONE FORD initiative during the platform overhaul, which further increased efficiencies and significantly reduced development costs.

The C2 platform started under the same conditions and is now the highest volume platform within the Ford Motor Company. Here the development team has succeeded not only in supporting typical C-segment vehicles with the platform, but the example of the Ford EVO also makes it clear that the platform has sufficient potential to serve as a basis for CD-segment vehicles. Even more derivatives will follow in the future.



Fig. 2: Expansion of the predecessor platform to achieve further synergies

5. Motivation for changing the front-end strategy

The front end of a car has always been an area in which many requirements come together and have to be reconciled with each other. New legal requirements relating to CO₂ reduction, continuously increased requirements for crash management and pedestrian protection must be met in order to be able to position the vehicles further in demanding markets.

Due to insurance classification tests, further improvements are required in order to keep maintenance costs low. Here, rising prices for LED lighting and the growing number of sensors are problematic in particular, as they are often located in the impact area of the barrier and in the event of damage mean high repair costs. The cassette shape of the new front-end carrier protects the expensive and sensitive cooling package from damage and carries the cooling unit safely into the survival area.

Pedestrian protection is increased beyond the legal minimum by Euro NCAP in order to further boost the attractiveness of the vehicle as a safe means of transport. Robustness in assembly is here often at odds with the yieldingness required, by which the pedestrian can be protected. A redesign of the front end vehicle now allows the headlights to dip away upon contact with a pedestrian and not to be stopped at hard structures.

The introduction into high-volume production of an active grille shutter system, which is integrated into the cooling package carrier, contributes significantly to CO₂ reduction, with integration keeping system costs low and reducing total weight.

6. Architecture development

The most important requirements for the front-end carrier system are listed below:

- Insurance classification
- Airbag sensor signal reliability
- Technical 'front end' overhang
- Active grille shutter system takes up a high proportion of the total volume
- Prevention of recirculation of cooling air
- Seal efficiency
- Global assembly processes
- Pedestrian protection
- Water management
- Platform common-part status
- Repairability
- Engine air intake

- Cooling package connection rigidities
- Cooling package complexity for conventional and electric vehicles
- Scalability
- Tolerances for the gap and fit image
- Global production capacities
- High degree of integration
- Styling-neutral design
- Minimization of costs, investment, weight, development costs and also logistics costs

These requirements have been broken down in a SWOT analysis. This approach makes it possible to set up four categories, representing strengths, weaknesses, opportunities and threats.



Fig. 3: SWOT analysis categories

In this specific case, the team then developed this classification:

<ul style="list-style-type: none"> • High degree of integration • Styling-neutral design • Scalability • ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Logistic costs • Repairability • ...
<ul style="list-style-type: none"> • High proportion of AGS • Global assembly processes • Seal efficiency • ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Airbag sensor reliability • Insurance classification • Tolerances for the gap and fit image • ...

Fig. 4: Assignment of the functions into the SWOT analysis categories

In order to identify the best solution, the design solutions developed are then examined with regard to how far they meet requirements.

In the present case, a front-end carrier cassette in hybrid design with integrated active grille shutter control was identified as the best solution. As module carrier it comprises the cooling package and other attachments and retracts as a unit from below into the body. Alignment is carried out via vehicle-specific screw-on surfaces and reference holes, which are used with fitting screws for the alignment of the front-end module carrier.

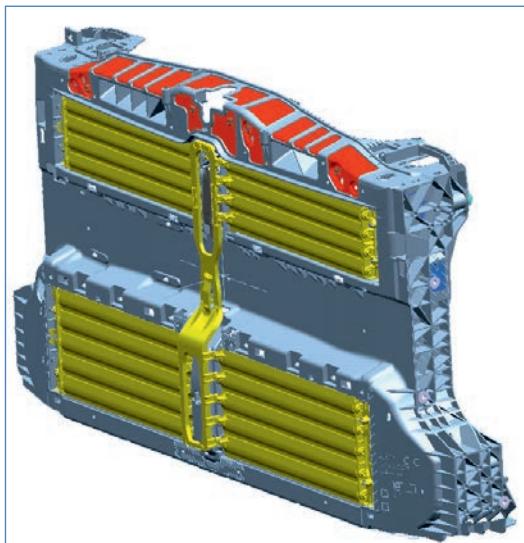


Fig. 5: The module carrier with integrated grille shutter system

Scalability was ensured by adapting the thermoplastic frame to the respective vehicle type (sedan, SUV, CUV and so on). Due to the common-part use of the deep-drawn steel beam, of the actuator and of the slats, considerable cost reductions were achieved.

Comparison of a Focus with the Bronco Sport in the Y0 section shows how the fiber-reinforced plastic frame adapted to the respective application ensures that the different requirements for hood height, ramp angle, cooling package holder and so on are met. However, it also makes clear that one of the biggest pitfalls in the design of the carrier is to insist on an incorrect proportion of common parts.

While in previous projects it was often possible to generalize by fitting the largest cooling package into the smallest car of a vehicle line in order to cover all other variants, when comparing the Y0 sections, it becomes clear that especially at Ford, where an off-road SUV is an important part of the vehicle range in every segment, this simplification no longer applies.

The off-road capability clearly required protection by raising the cooling-package position and the much higher position of the hood would no longer have been bridgeable with a longer locking bracket.

A scalable frame is here the best compromise between the different target variables.

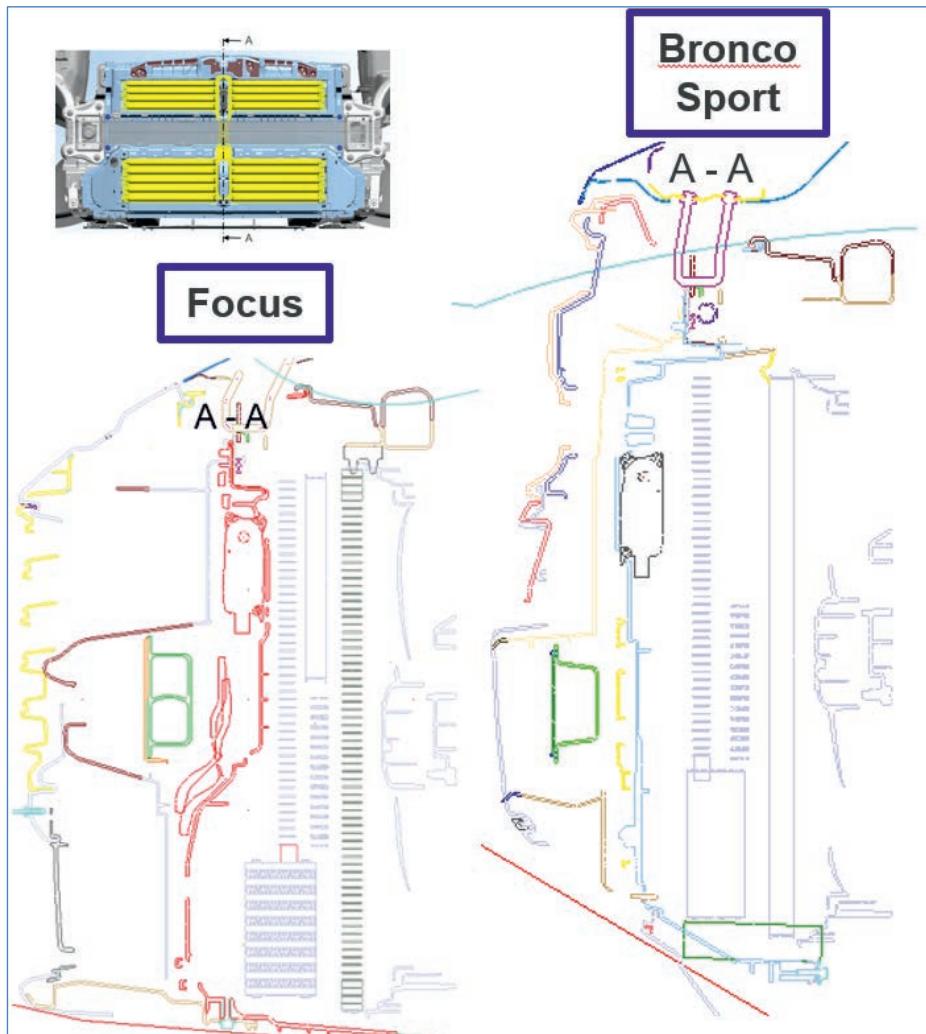


Fig. 6: Front view of the module carrier and Y0 sections of the Focus and Bronco Sport

7. Further product and process optimizations

The BAGS approach first chosen by the Ford Ecosport has been further optimized over the years to meet the requirements for cost and weight savings.

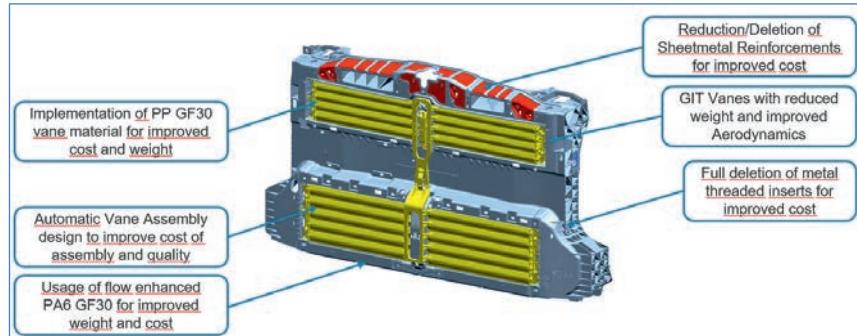


Fig. 7: The Focus BAGS with further cost-saving measures

On the process side, the labor-intensive, manual assembly of the functional AGS components has been replaced by a partially or fully automated assembly, which has also further increased the quality of the component.

In collaboration with the raw material supplier, the team switched from a standard PA6 GF35 material to a low-viscosity PA6 GF30 with which lower costs were achieved despite the higher price per kilo, since wall thickness could be further reduced in some low-loaded areas. For the vanes, a material change-over to PP GF30 was made, which enabled further savings to be achieved. In the case of the vanes, the Focus variant in particular is special, since, in order to improve costs and aerodynamics, the team chose a gas-injection design, which makes it possible to ensure a smooth surface on both sides of the vane.

The metal threaded inserts that were still in use at the start have been increasingly reduced, so that today, even with the BAGS threaded connections, metal inserts can be dispensed with. The steel insert was used from the start with a minimized wall thickness, and further investigations indicate the possibility of a successful reduction going as far as complete elimination.

These cost reductions are estimated at ~25%

For the C2 platform, about 2 million vehicles will be equipped with a total of seven BAGS variants, with production running in six plants worldwide.

8. Platform achievements

The central aspects of the success of the BAGS strategy are to be found in the areas of standardization and functional integration.

Functional integration is usually the initial driver here for introducing the new concept, since on the development side savings in investment and costs are very readily quantifiable.

Of course, a new global front-end strategy also requires some profound changes in the current production process, and a change must be evaluated both financially and culturally, since plant routine is often critical of innovations, since anything new can also be fraught with new risks.

The fact that the changes that the BAGS concept brings with it were also picked up and carried forward by the production team shows that its enormous advantages have also been seen on the assembly side. Specifically, it was possible to eliminate a complete component-group assembly step in the body shop and only a stamping embossing process had to be introduced for creating the important reference points. In final assembly, the BAGS module could then be brought into the vehicle with the existing fitting process without introducing a complex setting-up process.

The AGS (Active Grille Shutter) no longer was an individual sub-assembly, and fitting the seals could be implemented much more robustly.

In addition, the most important achievements of the BAGS concept are listed below (numerical values for C2 derivatives).

- Weight saving of ~2.5 kg (~21%)
- Part cost savings of ~30% compared to the predecessor platform
- Significant standardization of Ford manufacturing processes globally and across vehicle lines
- Investment savings of ~80% compared to the predecessor platform
- Complexity reduction from 27 to two BAGS systems for the Focus line
- Increase in anti-leakage efficiency led to a total saving of 1.5 g CO₂
- Sealing of the various cooling packages (6 for the KUGA) is achieved with individually adapted 2K strip seals
- Improved protection of the cooling package in the event of an insurance test
- Further improvements in system costs of ~25% will continue to ensure in the future the cost-effectiveness of the concept in use.
- The strategy has been implemented at Ford in the Fiesta, Focus, Mondeo and Explorer vehicle segments.

- The platform developments are leading to a significant reduction in the scope of development and testing both at Ford and on the supplier side.
- The BAGS strategy is part of Ford's modularity strategy and, according to current planning, will be used in ~70% of all globally manufactured ICE, HEV and BEV vehicles.

9. Outlook

The BAGS concept has shown impressively how a fundamental redesign of the front end can lead to significant improvements in all areas.

Of course, the front end is always being confronted with new challenges, which the BAGS concept will also face in the future and which will lead to adjustments or new concepts.

The most important areas are listed here:

- New EU rules to increase the use of recycled materials
- Stronger focus on electrification
- Further optimization of the AGS and sealing concept to increase the range of electric vehicles (exterior surfaces AGS)
- Storage space under the hood and its accessibility



BAGS: Hochintegrierter Front End Modulträger

Dipl.-Ing. **Lars Reifenstein**, Dipl.-Ing. **Bert Nießen**,
Ford Werke GmbH, Köln

1. Kurzfassung

Präsentation eines Front End Trägerkonzeptes mit integrierter, aktiver Luftklappensteuerung

2. Agenda

- Vorgängerplattformsituation
- Plattformvergleich C1 und C2
- Motivation für die Veränderung der Front End Strategie
- Architekturentwicklung
- Weitergehende Produkt- und Prozessoptimierungen
- Plattformerrungenschaften
- Ausblick

3. Vorgängerplattformsituation

Das Fundament der Vorgängerserie wurde im Jahr 2003 mit der Entwicklung der C1 Plattform gelegt, dessen erstes Derivat der Focus C-Max war. Hier kam ein Stahl-Plastik Hybridfrontendträger zum Einsatz, der im Karosseriebau montiert wurde. Die untere Kühlpaketträgerstruktur war eine Schweißbaugruppe, die in der Hochzeit zusammen mit dem Kühlpaket an die Karosse verschraubt wurde. Mit dem Focus 2013 wurde die aktive Luftklappensteuerung zum ersten Mal bei einem Fahrzeughersteller großvolumig eingeführt, was mit der bestehenden Kühlpaketkomplexität zu großen Investitions- und Teilekosten führte. Die aktive Luftklappensteuerung wurde in verschiedenen Varianten entweder an das Kühlpaket oder die Stoßstange vormontiert. Die Abdichtung gestaltete sich oft schwierig, weil die Luftklappensteuerung an den bereits montierten Stoßfängerüberzug vorbeigeführt werden musste.

Bei der Neukonzeption der Rohbaustruktur und der Kühlpaketarchitektur während der Entwicklung der C2 Plattform konnten die Montageprobleme gelöst und weitere Synergien erzielt werden.

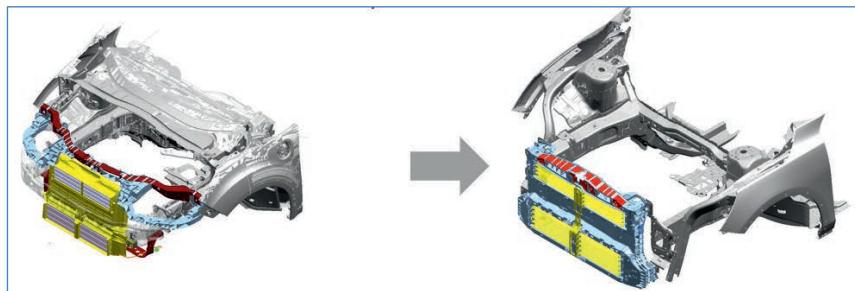


Bild 01: Wechsel von einer mehrteiligen Baugruppe zu einem hochintegrierten Frontendträgersystem

4. Plattformvergleich C1 und C2

Die C1 Plattform war von Anfang an als globale Plattform ausgelegt, und die Fahrzeuge wurden in Europa, Südamerika und Asien gefertigt. Nordamerikanische Produkte wie Focus oder Escape wurden im Rahmen der ONE FORD Initiative von Alan Mulally bei der Plattform-Überarbeitung ab 2012 integriert, was die Effizienzen weiter steigerte und die Entwicklungskosten signifikant reduzierte.

Die C2 Plattform startete mit den gleichen Bedingungen und ist heute die volumenstärkste Plattform innerhalb der Ford Motor Company. Es ist dem Entwicklungsteam hier gelungen, mit der Plattform nicht nur die typischen C-Segment Fahrzeuge zu unterstützen, am Beispiel des Ford Evos wird auch klar, dass die Plattform ausreichend Potential besitzt, als Basis für CD-Segment Fahrzeuge zu dienen. Hier werden in der Zukunft noch weitere Derivate folgen.

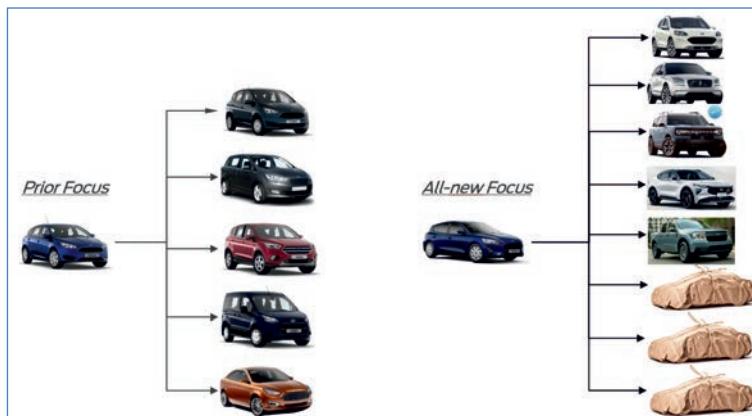


Bild 02: Ausbau der Vorgängerplattform zur Erzielung von weiteren Synergien

5. Motivation für die Veränderung der Front End Strategie

Das Front End eines PKW ist seit jeher ein Bereich, in dem sehr viele Anforderungen zusammenkommen und miteinander in Einklang gebracht werden müssen. Neue gesetzliche Vorgaben zur CO₂ Reduzierung, kontinuierlich erhöhte Anforderungen an das Crashmanagement und den Fußgängerschutz müssen erfüllt werden, um die Fahrzeuge in den anspruchsvollen Märkten weiter platzieren zu können.

Weitere Verbesserungen werden durch Versicherungseinstufungstests gefordert, um die Unterhaltskosten gering zu halten. Hier sind speziell die steigenden Preise für die LED-Beleuchtung und die wachsende Menge an Sensoren problematisch, da sie sich oft im Einschlagbereich der Barriere befinden und im Schadensfall hohe Reparaturkosten nach sich ziehen. Die Kassettenform des neuen Front End Trägers schützt das teure und empfindliche Kühlpaket vor Beschädigungen und transportiert die Kühleinheit sicher in den Überlebensraum.

Der Fußgängerschutz wird durch Euro NCAP über das gesetzliche Mindestmaß gesteigert, um die Attraktivität des Fahrzeugs als sicheres Verkehrsmittel noch weiter zu steigern. Hier stehen Robustheit im Zusammenbau oft im Widerspruch zu den benötigten Nachgiebigkeiten, durch die der Fußgänger geschützt werden kann. Eine Umkonstruktion des Front End Trägers erlaubt den Scheinwerfern jetzt, beim Auftreffen des Fußgängers wegzurollen und nicht an harten Strukturen gestoppt zu werden.

Die großvolumige Einführung einer aktiven Luftklappensteuerung, die in den Kühlpaketträger integriert ist, trägt wesentlich zur CO₂ Reduzierung bei, wobei die Integration die Systemkosten geringhält und das Gesamtgewicht reduziert.

6. Architekturentwicklung

Im Folgenden sollen die wichtigsten Anforderungen an das Front End Trägersystem genannt werden:

- Versicherungseinstufung
- Airbag Sensor Signal Zuverlässigkeit
- Technischer ‚Front End‘ Überhang
- Hoher Anteil der aktiven Luftklappensteuerung am Gesamtvolumen
- Vermeidung der Rezirkulation der Kühlluft
- Effizienz der Dichtung
- Globale Montageprozesse
- Fußgängerschutz
- Wassermanagement

- Plattformgleichteilstatus
- Reparierbarkeit
- Motorluftansaugung
- Kühlpaketanbindungssteifigkeiten
- Kühlpaketkomplexität für herkömmliche und elektrifizierte Fahrzeuge
- Skalierbarkeit
- Toleranzen für das Spalt- und Passungsbild
- Globale Produktionskapazitäten
- Hohes Maß an Integration
- Stylingneutrales Design
- Minimierung von Kosten, Investitionen, Gewicht und Entwicklungs- wie auch Logistikkosten

Diese Anforderungen sind in einer SWOT-Analyse unterteilt worden. Der Ansatz erlaubt es, vier Kategorien zu bilden, die jeweils die Stärken, Schwächen, Möglichkeiten und Risiken darstellen.

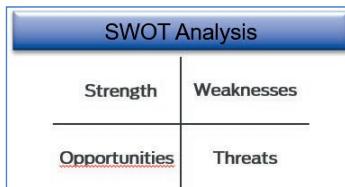


Bild 03: SWOT Analyse Kategorien

Im konkreten Fall hat das Team dann diese Einteilung entwickelt:

<ul style="list-style-type: none"> • Hohes Maß an Integration • Stylingneutrales Design • Skalierbarkeit • ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Logistikkosten • Reparierbarkeit • ...
<ul style="list-style-type: none"> • Hoher Anteil AGS • Globale Zusammenbauprozesse • Effizienz der Dichtung • ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Airbag Sensor Signalzuverlässigkeit • Versicherungseinstufung • Toleranzen für das Spalt- und Passungsbild • ...

Bild 04: Zuordnung der Funktionen in die SWOT Analyse Kategorien

Die entwickelten Designlösungen werden dann auf den Erfüllungsgrad der Anforderungen untersucht, um die beste Lösung zu identifizieren.

Im vorliegenden Fall ist eine Front End Trägerkassette in Hybridbauweise mit integrierter aktiver Luftklappensteuerung als beste Lösung identifiziert worden, die als Modulträger das Kühlpaket und weitere Anbauteile umfasst und als Einheit in der Hochzeit von unten in die Karosse eingefahren wird. Die Ausrichtung erfolgt über fahrzeugindividuell gesetzte Anschraubflächen und Referenzlöcher, die mit Passschrauben zur Ausrichtung des Front End Modulträgers genutzt werden.

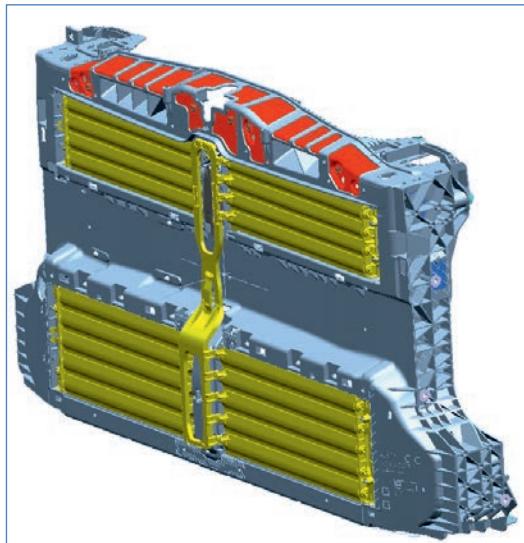


Bild 05: Darstellung des Modulträgers mit integrierter Luftklappensteuerung

Die Skalierbarkeit wurde gewährleistet, indem der thermoplastische Rahmen auf den jeweiligen Fahrzeugtyp angepasst wurde (Sedan, SUV, CUV,...). Durch den Gleichteileinsatz des Stahlträgers in Tiefziehbauweise, des Aktuators und der Lamellen wurden erhebliche Kostenreduzierungen erreicht.

Der Vergleich eines Focus mit dem Bronco Sport im Y0 Schnitt zeigt, wie der auf die jeweilige Anwendung angepasste faserverstärkte Kunststoffrahmen die unterschiedlichen Anforderungen an Haubenhöhe, Rampenwinkel, Kühlpaketaufnahme, usw. sicherstellt. Er verdeutlicht aber auch, dass einer der größten Fallstricke bei der Konzeption des Trägers darin besteht, auf das falsche Maß an Gleichteilen zu beharren.

Während man bei früheren Projekten oft pauschalisieren konnte, indem man das größte Kühlpaket in das kleinste Auto einer Fahrzeuglinie brachte, um damit alle weiteren Varianten abzudecken, wird bei der Gegenüberstellung der Y0 Schnitte klar, dass gerade bei Ford, wo in jedem Segment ein geländetaugliches SUV einen wichtigen Teil der Fahrzeugpalette darstellt, diese Vereinfachung nicht mehr greift.

Die Geländetauglichkeit verlangte eindeutig nach Schutz durch Anhebung der Kühlpaketposition und die wesentlich höhere Position der Haube wäre mit einem längeren Schließbügel nicht mehr zu überbrücken gewesen.

Ein skalierbarer Rahmen ist hier der beste Kompromiss zwischen den unterschiedlichen Zielgrößen.

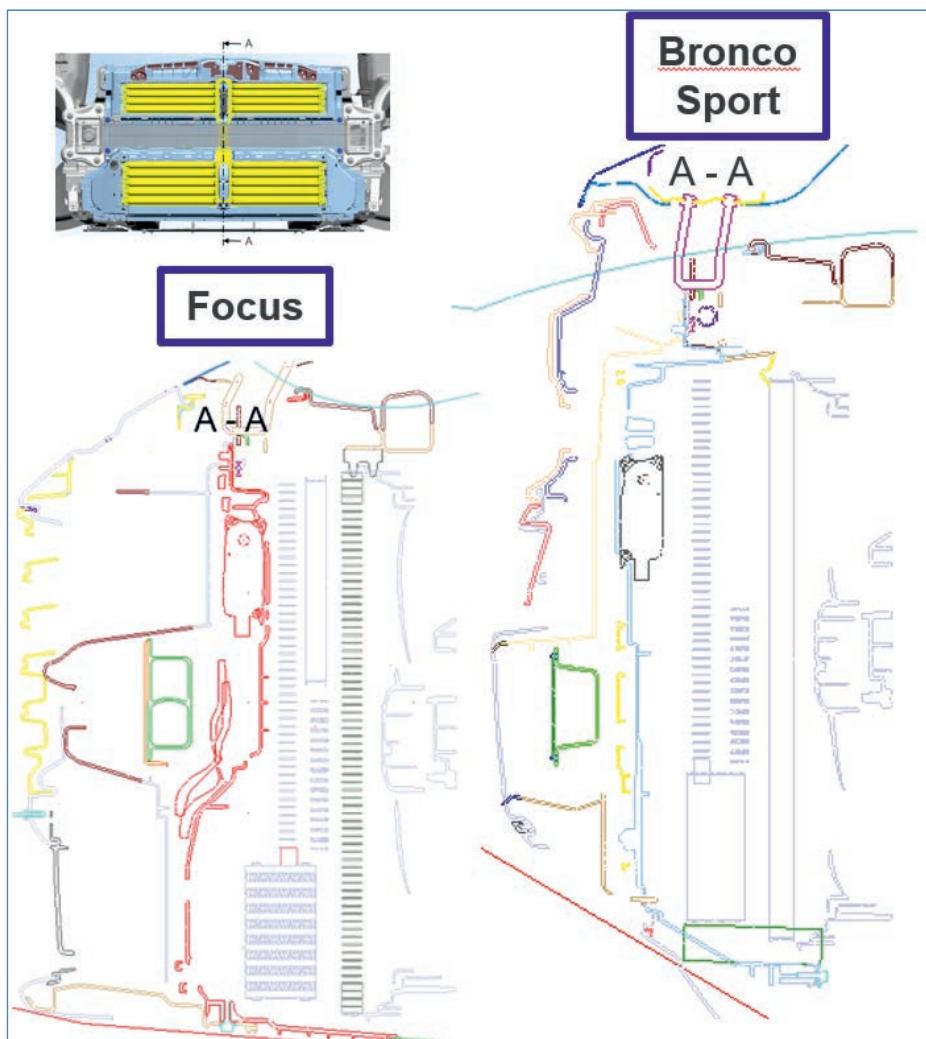


Bild 06: Frontansicht des Modulträgers und Y0 Schnitte von Focus und Bronco Sport

7. Weitergehende Produkt- und Prozessoptimierungen

Der zuerst beim Ford Ecosport gewählte BAGS Ansatz ist über die Jahre weiter optimiert worden, um den Anforderungen an Kosten- und Gewichtseinsparungen gerecht zu werden.

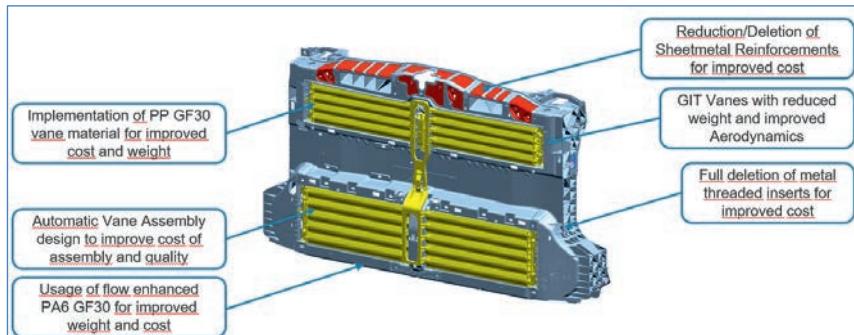


Bild 07: Beispielhafte Darstellung des Focus BAGS mit weiteren Kosteneinsparmaßnahmen

Auf der Prozessseite ist die arbeitsaufwendige, manuelle Montage der funktionellen AGS-Bauteile durch eine teil- oder vollautomatisierte Montage ersetzt worden, was auch die Qualität des Bauteils weiter erhöht hat.

In Zusammenarbeit mit dem Rohmateriallieferanten ist das Team von einem Standard PA6 GF35 Material auf ein niedrigviskoses PA6 GF30 gewechselt, mit dem trotz höherem Kilopreis unterm Strich niedrigere Kosten erreicht wurden, da in einigen niedrig belasteten Bereichen die Wandstärke weiter reduziert werden konnte.

Bei den Lamellen wurde ein Materialwechsel auf PP GF30 vollzogen, womit weitere Einsparungen erzielt werden konnten. Bei den Lamellen ist insbesondere die Focusvariante besonders, da das Team hier zur Kosten- und Aerodynamikverbesserung eine Gasinjektionsbauweise gewählt hat, die es ermöglicht, eine beidseitig glatte Oberfläche auf der Lamelle zu gewährleisten.

Die am Anfang noch im Einsatz befindlichen Metallschraubeinsätze wurden zunehmend reduziert, so dass heute selbst bei den BAGS-Verschraubungen auf Metalleinsätze verzichtet werden kann. Der Stahleinleger wurde von Anfang an mit einer minimierten Wandstärke eingesetzt, und weitere Untersuchungen weisen auf die Möglichkeit zu einer erfolgreichen Reduzierung bis hin zum völligen Entfall hin.

Diese Kostenreduzierungen werden mit ~25% abgeschätzt.

Für die C2 Plattform werden etwa 2 Millionen Fahrzeuge mit insgesamt 7 BAGS Varianten ausgestattet werden, die Fertigung läuft in 6 Werken weltweit.

8. Plattformerrungenschaften

Die zentralen Aspekte des Erfolgs der BAGS Strategie sind im Bereich der Vereinheitlichung und der Funktionsintegration verortet.

Dabei ist die Funktionsintegration meist der initiale Treiber, um das neue Konzept einzuführen, da auf der Entwicklungsseite die Einsparungen von Investitionen und Kosten sehr gut quantifizierbar sind.

Natürlich verlangt eine neue globale Front End Strategie auch teils tiefgreifende Änderungen in den gegenwärtigen Produktionsablauf, und eine Änderung muss sowohl finanziell als auch kulturell bewertet werden, da der Werksalltag Innovationen gegenüber oft kritisch stimmt, da alles, was neu ist, auch mit neuen Risiken behaftet sein kann.

Die Tatsache, dass die Änderungen, die das BAGS Konzept mit sich bringt, auch von der Fertigungsmannschaft mit- und vorangetragen wurden, zeigt, dass man auch auf der Montageseite die enormen Vorteile gesehen hat. Konkret konnte man im Karosseriebau eine komplette Bauteilgruppenmontage eliminieren und musste lediglich einen Stanzprägeprozess zur Schaffung der wichtigen Bezugspunkte einführen. In der Endmontage konnte das BAGS-Modul dann mit dem bestehenden Prozess der Hochzeit in das Fahrzeug gebracht werden, ohne einen aufwendigen Einrichtungsprozess einzuführen.

Der AGS (Active Grille Shutter) entfiel als Einzelbaugruppe und die Montage der Dichtungen konnte wesentlich robuster ausgeführt werden.

Im Weiteren werden die wichtigsten Errungenschaften des BAGS-Konzeptes aufgeführt (Zahlenwerte für C2 Derivate).

- Gewichtseinsparung von ~2,5kg (~21%)
- Teilekosteneinsparung von ~30% gegenüber der Vorgängerplattform
- Signifikante Vereinheitlichung der Ford Herstellungsprozesse global und fahrzeuglinienübergreifend
- Investitionseinsparungen von ~80% gegenüber der Vorgängerplattform
- Komplexitätsreduktion von 27 auf 2 BAGS Systeme für Focusline
- Steigerung der Dichtigkeitseffizienz führte zu einer Gesamteinsparung von 1,5g CO₂
- Abdichtung der verschiedenen Kühlpakete (6 beim KUGA) wird mit individuell angepassten Streifendichtungen in 2K erreicht
- Verbesserter Schutz des Kühlpakets im Versicherungstestfall
- Weitere Verbesserungen der Systemkosten von ~25% sichern auch in Zukunft die Wirtschaftlichkeit des Konzepts im Einsatzfall

- Die Strategie ist bei Ford in den Fiesta-, Focus-, Mondeo- und Explorer-Fahrzeugsegmenten implementiert worden
- Die Plattformentwicklungen führen zu einer signifikanten Reduzierung der Entwicklungs- und Testumfänge sowohl bei Ford, als auch auf der Lieferantenseite
- Die BAGS-Strategie ist Teil der Ford Modularitäts-Strategie und wird gemäß der aktuellen Planung bei ~70% aller global gebauten ICE-, HEV- und BEV Fahrzeuge zum Einsatz kommen.

9. Ausblick

Das BAGS Konzept hat eindrucksvoll gezeigt, wie eine grundlegende Neuauslegung des Front Ends zu signifikanten Verbesserungen in allen Bereichen führen kann.

Natürlich ist das Front End mit immer neuen Herausforderungen konfrontiert, denen sich auch das BAGS-Konzept in der Zukunft stellen wird und die zu Anpassungen oder Neukonzeptionierungen führen werden.

Die wichtigsten Bereiche sind hier aufgeführt:

- Neue EU-Vorschriften zur Steigerung des Einsatzes von Recycling Materialien
- Stärkerer Fokus auf die Elektrifizierung
- Weitere Optimierung des AGS- und Dichtungskonzepts zur Vergrößerung der Reichweite bei elektrisch betriebenen Fahrzeugen (Aussenflächen- AGS)
- Stauraum unter der Motorhaube und dessen Erreichbarkeit



Lightweight plastic construction with visible surface as exemplified by the Volkswagen ID.3 tailgate

Dr.-Ing. **Peter Helmke**, Volkswagen AG, Wolfsburg;
Dr.rer.nat. **Bernhard Pfeiffer**, Celanese GmbH, Sulzbach

Abstract

Volkswagen's e-offensive is picking up speed. The first vehicle of the new electric car generation is the ID.3. It is based on the completely newly developed MEB platform (MEB = modular electric drive toolkit). This platform is designed purely for electric vehicles and makes the best possible use of the possibilities of e-mobility. The ID.3 thus offers long ranges, plenty of space in the interior and dynamic handling. A positive contribution to this is made by innovative and affordable lightweight construction measures.

In this vehicle the tailgate, conventionally made of steel, is designed for the first time in the Volkswagen Group as a plastic-metal hybrid component. In order to meet the high stiffness requirements, the relevant structural part is designed in recyclable thermoplastic long-glass-fiber plastic with metal reinforcement elements. This design allows a high degree of design freedom and functional integration. Areas visible to the customer are directly reproduced with the PP long-glass-fiber materials without any additional treatment step.

For more than two decades, CELANESE has been the market and technology leader with Celstran® LFT long-fiber injection-molding compound. The next leap in innovation in the field of long-fiber reinforcement is the production of components dyed the same color as the vehicle interior. Pultrusion technology makes a full fiber impregnation possible. With Celstran® LFT, the colorant is already contained in the pellets and does not need to be added later. This makes possible the production of visible parts with exceptionally good surfaces. In addition, Celstran® LFT is UV-stabilized to prevent color changes in the case of sunlight exposure. The material is emissions-reduced to allow use in vehicle interiors.

The combination of a low dead weight with excellent mechanical properties at -40 to +120 °C is provided in particular by the long-glass-fiber reinforced Celstran® LFT PP types from Celanese. The special strength of the 'long-fiber skeleton' reveals itself in impact stresses in the crash test.

With the patented pultrusion technology used here, it is possible to introduce into the material all additives such as thermal stabilizers, UV stabilizers and also the colorant in a single process step without causing fiber damage. In injection molding, this newly developed

lightweight material concept can be used for producing structural components with visible surfaces. For bright colors, Celanese has also developed an antistatic Celstran® LFT type. Contamination by electrostatic dust deposition can be prevented thereby.

For the Volkswagen ID.3 tailgate, a completely new design concept has been pursued. Here, structural parts are not screwed but glued together. This also saves costs through a highly automated glueing technology in production. An important task in development was to mutually balance the material and the glueing process in order to ensure the best possible bonding over the entire temperature range. At VW, material pretreatment in the series process was optimized for this purpose and Celanese adjusted the material to the process in further steps.

In addition to the construction, the challenges of the component are dealt with, as well as manufacturing processes and specific material properties. The technology thus developed can be transferred to other lightweight structural components in the visible area. In the case of future components in the car, pressure relating to the recyclability of materials both during production and after the life cycle is also increasing more and more as the result of legislation. Celanese's recyclable thermoplastic materials enable a high potential for resource conservation and cost savings.

1. ID.3: Volkswagen's e-offensive

With the ID.3, the first vehicle of the new e-generation based on the MEB platform, Volkswagen is picking up speed. With this starting signal, Volkswagen is clearly committed to the Paris Climate Agreement, according to which the global temperature increase is to be limited by 2050 to well below 2°. By 2050 Volkswagen as a company therefore intends to be completely CO₂-neutral, that is to say, both in vehicles and in production. Only a high proportion of e-vehicles will make possible compliance with CO₂ requirements, especially in the EU.

Electric vehicles have the best carbon footprint over their entire service life when comparing drive types, which is why the Volkswagen Group is focusing on the largest e-offensive in the automotive industry with up to 70 all-electric models planned up until 2030. [1]

Since the beginning of 2020 the proportion of electric vehicles in the production of German manufacturers has almost quadrupled to about 20% [2]. In addition to the publicly discussed

charging infrastructure and its expansion, the central factor in e-mobility is the range of the vehicles. A contribution to optimizing range is made by affordable lightweight construction measures.

2. Tailgate in plastic-metal hybrid construction

The plastic-metal hybrid design of the ID.3 tailgate, as the first tailgate of this design in the Volkswagen Group, offers an interesting potential for lightweight construction as compared to the conventional construction in steel. Although a direct comparison of two component/design concepts is difficult, it can be approximated by a comparison based on projected component surfaces. If the ID.3 plastic-metal-hybrid tailgate is compared to a very similar tailgate geometry in steel, and the projected surfaces of the components are mutually normalized, a lightweight construction potential of up to approx. 20% will emerge for the plastic-metal-hybrid concept.

In addition to the weight advantage, this design offers further advantages: a high degree of design freedom, such as recesses or aerodynamic shape adjustments. Functions can also be integrated, e.g. brackets and receptacles that are reproduced directly in the injection-molding component. Since the metal in the plastic component is mostly encapsulated, susceptibility to corrosion is low. Another manufacturing advantage of the plastic-metal-hybrid concept is the possibility of producing a fully painted tailgate module, since compared to the steel construction, the components to be painted do not have to be painted together with the body shell and only then complemented. Due to the comparatively lower level of investment, costs can be saved depending on the number of units produced with the plastic-metal-hybrid design.

Structure

Fig. 1 below shows the basic structure of the ID.3 tailgate. The individual components are glued with a two-pack structural adhesive (made of polyurethane).

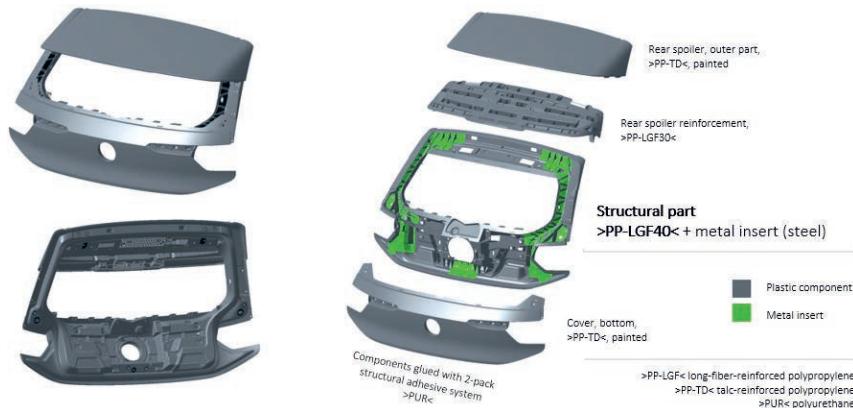


Fig. 1: Structure of the tailgate

Challenges of the structural part

The main challenges in the conception, properties and process control of the structural part used are listed below. The requirements are here divided into three main areas and summarized.

Plastic-metal hybrid

- High mechanical component requirements (rigidity, torsion)
- Toughness / crash resistance
- High dimensional stability under heat
- Low thermal expansion
- Compatibility with metal reinforcement
- Low tendency to creep
- Low warpage

PP-LGF40 in the visible area

- High glass-fiber content (mechanics)
- Gloss level and color match
- UV stability
- Good odor and emission properties

Glueing PP-LGF40

- Pretreatment of the adhesive surfaces necessary
 - Cleaning (isopropanol)
 - Surface activation polypropylene (plasma / flame)
 - Fully automated application of adhesive (2-pack structural adhesive, dynamically mixed)
- Interaction with stabilizers

3. Celanese-engineered materials – Celstran® LFRT (Celanese GmbH)

3.1 Material requirements

VW asked Celanese to develop a material for the tailgate of the new ID.3. The requirements were submitted and were very challenging. They are shown in **Fig. 2**.

ID.3 Tailgate - Demanding Requirements		
APPEARANCE	GLUEING & METAL INSERTS	
<ul style="list-style-type: none"> ▶ Good Surface Appearance with Grained Surface ▶ Color Match, Gloss Level, Scratch Resistance 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Low Dimensional Changes over Temperature Range ▶ CLTE Near to Metal ▶ Heat Aging 120 °C ▶ Heat Aging 150 °C 	
MECHANICS	INTERIOR	
<ul style="list-style-type: none"> ▶ Crash Behavior ▶ Strength + Stiffness ▶ Low Warpage 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Odor & Emissions ▶ UV Performance 	
external	Celanese Corporation	source: Volkswagen Newsroom

Fig. 2: Requirements for the structural / visible part of the ID.3 tailgate

The tailgate is a visible part in the color of the vehicle interior. The surface was to be given a new graining not previously used at VW. In addition to the high quality surface and the color of the vehicle interior, the material was to have a low gloss level and good scratch resistance. Previous tailgates were made of metal and the load-bearing structure in this case was to be made of plastic. This included the crash requirements as well as stiffness and strength specifications, as well as low warpage and low creep under permanent load and increased temperature. To ensure this, metal inserts were provided that were to be overmolded. In addition, the load-bearing structure of the tailgate was to be glued to the carrier of the spoiler. This called for a low thermal expansion and a coefficient of expansion

as similar as possible to that of metals. The components were to be tested up to 120°C and the material should be resistant up to 150°C. Since the visible area is inside the vehicle, odor and emission requirements for the vehicle interior had to be met. Finally, the visible area must have the necessary UV resistance.

3.2 Material selection

In the plastics sector, Celanese has one of the broadest material portfolios on the market. This includes semi-crystalline thermoplastics from polypropylene, POM, polyester and polyamides, via the high-temperature thermoplastics PPS and LCP, through to PEEK. Celanese is also a specialist in both short-fiber and long-fiber reinforcements. Thermoplastic elastomers and amorphous thermoplastics are also available (Fig. 3). In particular, sustainability and recycling materials which Celanese offers in its portfolio are highlighted in green in Fig. 3.

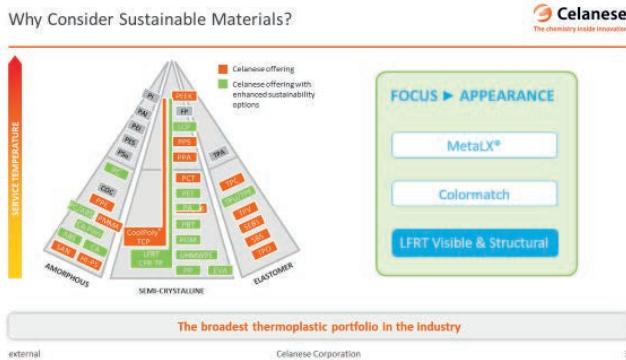


Fig. 3: Celanese has one of the broadest material portfolios in the plastics sector. Focus topic of 'appearance' with the combination of structural and visible components with long-fiber-reinforced thermoplastics.

For this reason it was possible to offer the best material solution here without any restrictions. In addition, one focus at Celanese is the support of visible surfaces, for example in the areas of 'MetalX®', 'color adjustments' and the 'combination of visible and structural components with long-fiber-reinforced thermoplastics'. It quickly became clear that the last focus topic would have the greatest prospect of success here. Full fiber impregnation in the case of long-fiber-reinforced thermoplastics has a decisive role to play in the high-quality

surface appearance of long-fiber-reinforced thermoplastics. At Celanese, this is achieved with pultrusion technology (**Fig. 4**).

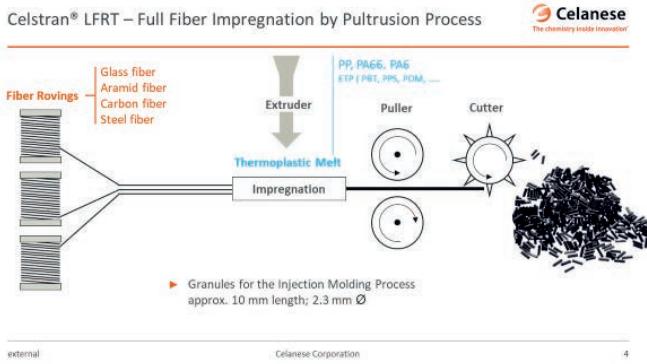


Fig. 4: Pultrusion for the production of Celstran® LFRT and full 'impregnation' of the fibers

Fig. 5 shows schematically the development from a short-fiber pellet via 'wire coating' to a fully 'impregnated' long-fiber pellet.

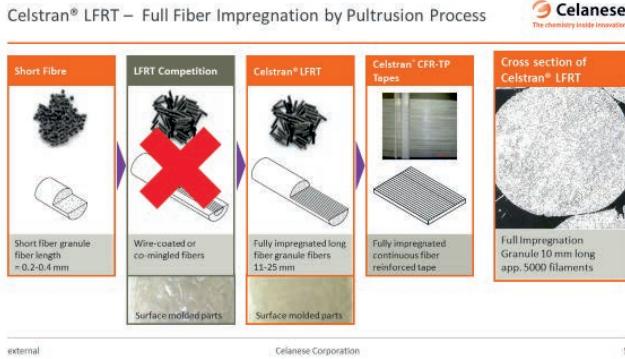


Fig. 5: Full impregnation of long-glass-fiber pellets (schematic representation: short-fiber pellet, 'wire coating', fully 'impregnated' long-fiber pellet, up to tape production) and cross-section through a fully 'impregnated' pellet and the surface quality achieved.

In order to meet the mechanical requirements relating to stiffness, strength and crash (impact strength), a polypropylene with a glass-fiber content of 40% was required. With this choice of material it was also possible to meet the requirement of a low coefficient of expansion close

to that of metals. A particular challenge was thermal resistance in combination with UV protection and the odor and emission requirements. Here, the existing formulations had to be revised and an adapted new formulation created. The results of these developments are shown in **Fig. 6**.

ID.3 Tailgate - Demanding Requirements



APPEARANCE

- ▶ Good Surface Appearance with Grained Surface
- ▶ Color Match, Gloss Level, Scratch Resistance
- Fully impregnated long fibers with special color development



MECHANICS

- ▶ Crash Behavior
 - ▶ Strength + Stiffness
 - ▶ Low Warpage
- PP-LGF 40

Source Volkswagen Newson

external

GLUEING & METAL INSERTS

- ▶ Low Dimensional Changes over Temperature Range
- ▶ CLTE near to metal
- ▶ Heat Aging 120 °C
- ▶ Heat Aging 150 °C
- PP-LGF 40 with special developed heat aging package

INTERIOR

- ▶ Odor & Emissions
- ▶ UV Performance

Formulation for interior applications
-0453, -0455 and specially developed UV package

10

Celanese Corporation

Fig. 6: Summary of material development for the ID.3 tailgate.

The series materials are shown in **Fig. 7**. A Celstran® LFRT PP-GF 40-0455 SOUL 4PK is used for the tailgate. There are no visibility and therefore no UV requirements for the spoiler carrier. In addition, a glass-fiber content of 30% is sufficient. For this reason, it was possible to use a high-performance product for structural parts in black from Celanese.

SUMMERY: ID.3 - Tailgate Material Selection



Source: AZMAGI

external

Celanese Corporation

11

Fig. 7: Material selection for the tailgate frame and spoiler carrier

3.3 Outlook

For the future, the possibility of continuous-fiber tape production that is also shown in **Fig. 3** represents an immense potential.

OUTLOOK
Celstran® CFR-TP Tapes as Local Reinforcement or Insert

Celstran® CFR-TP Tapes

Additional Potential for E-Mobility:
 ► Battery Housing Reinforcement
 ► Frontends
 ► Seating

external Celanese Corporation 12

Fig. 8: Celstran® CFR-TP continuous-fiber tape processing as 'local reinforcement' in the handle recess of an inside door handle

Celanese has extensive know-how in the manufacture of Celstran® CFR-TP tapes. The tapes can be used in a single layer, for example as 'local reinforcement' (typically 0.25 mm thick, **Fig. 8**) or in multiple layers (e.g. 4 layers, typically 1 mm thick) as an 'insert'. The aim here is to replace the metal inserts and thus to save weight and costs. The tapes are then accordingly reinforced unidirectionally with continuous fibers made of a polypropylene with 70% glass fiber content. In the case of multi-layer processing, different laying angles (e.g. 0°/90° or 0°/45°) can be implemented. Since the tapes have the same matrix polymer as the injection-molding compound, a unit with the injection-molding compound is formed without pretreatment, especially in the case of 'local reinforcement'. The tapes are then inseparably connected to the injection-molding compound.

Sources:

- [1] Volkswagen AG, www.volksnewsroom.com, 01.06.2021, ID. INSIGHTS Sustainable E-Mobility, February 2019
- [2] VDA 2021, www.vda.de, 20.05.2021

Kunststoffleichtbau mit Sichtoberfläche am Beispiel der Heckklappe Volkswagen ID.3

Dr.-Ing. **Peter Helmke**, Volkswagen AG, Wolfsburg;
Dr.rer.nat. **Bernhard Pfeiffer**, Celanese GmbH, Sulzbach

Kurzfassung

Die E-Offensive von Volkswagen nimmt Fahrt auf. Das erste Fahrzeug der neuen E-Auto-Generation ist der ID.3. Er basiert auf der vollständig neu entwickelten MEB Plattform (MEB=Modulare E-Antriebs-Baukasten). Diese Plattform ist rein auf Elektro ausgelegt und schöpft die Möglichkeiten der E-Mobilität bestmöglich aus. So verfügt der ID.3 über hohe Reichweiten, viel Platz im Innenraum und ein dynamisches Fahrverhalten. Positiven Beitrag hierzu leisten innovative bezahlbare Leichtbaumaßnahmen.

Die Heckklappe, herkömmlich in Stahlbauweise, wird bei diesem Fahrzeug erstmals im Volkswagen-Konzern als Kunststoff-Metall-Hybridbauteil ausgeführt. Um die hohen Steifigkeitsanforderungen zu erfüllen, ist das maßgebliche Strukturteil in recyclingfähigem thermoplastischem Langglasfaser-Kunststoff mit metallischen Verstärkungselementen ausgeführt. Diese Bauweise erlaubt eine hohe Designfreiheit und Funktionsintegration. Für den Kunden sichtbare Bereiche werden ohne zusätzlichen Behandlungsschritt mit den PP-Langglasfaser-Materialien direkt abgebildet.

Seit mehr als zwei Jahrzehnten ist CELANESE mit Celstran® LFT Langfaser Spritzgussmaterial Markt – und Technologieführer. Der nächste Innovationssprung im Bereich der Langfaserverstärkung ist die Herstellung von in Wageninnenraumfarbe eingefärbten Bauteilen. Mit der Pultrusionstechnologie ist eine vollständige Faserimprägnierung möglich. Bei Celstran® LFT ist die Farbe schon im Granulat enthalten und muss nicht später zugesetzt werden. Das ermöglicht die Herstellung von Sichtteilen mit außergewöhnlich guten Oberflächen. Zusätzlich ist das Celstran® LFT UV stabilisiert, um Farbänderungen bei Sonneneinstrahlung zu verhindern. Das Material ist emissionsreduziert zum Einsatz im Fahrzeuginnenraum.

Die Kombination eines geringen Eigengewichts mit ausgezeichneten mechanischen Eigenschaften bei -40 bis +120 °C stellen insbesondere die langglasfaserverstärkten Celstran® LFT PP Typen von Celanese zur Verfügung. Die besondere Stärke des „Langfaser skeletts“ zeigt sich bei Schlagbeanspruchungen im Crash Test.

Mit der hier verwendeten patentierten Pultrusionstechnologie ist es möglich, alle Additive wie thermische Stabilisatoren, UV Stabilisatoren und auch die Farbe in einem einzigen Prozessschritt ohne Faserschädigung in das Material einzubringen. Im Spritzguss können mit diesem neu entwickelten Materialkonzept Leichtbau Strukturauteile mit Sichtoberflächen hergestellt werden. Für helle Farben wurde von Celanese auch eine antistatische Celstran® LFT Type entwickelt. Hiermit kann die Verschmutzung durch elektrostatische Staubablagerung verhindert werden.

Für die Volkswagen ID3 Heckklappe hat man ein vollständig neues Konstruktionskonzept verfolgt. Hierzu werden die Strukturteile nicht verschraubt, sondern verklebt. Dies spart zusätzlich Kosten durch eine hochautomatisierte Klebetechnologie in der Fertigung. Eine wichtige Aufgabe in der Entwicklung bestand darin, das Material und den Klebeprozess aufeinander abzustimmen, um eine möglichst gute Verklebung über den kompletten Temperaturbereich sicherzustellen. Bei VW wurde hierfür die Materialvorbehandlung im Serienprozess optimiert und von Celanese wurde das Material in weiteren Schritten auf den Prozess abgestimmt.

Behandelt werden neben dem Aufbau die Herausforderungen des Bauteils, als auch Herstellverfahren und spezifische Materialeigenschaften. Die erarbeitete Technologie kann auf weitere Leichtbau Strukturauteile im Sichtbereich übertragen werden. Bei zukünftigen Bauteilen im Auto nimmt zudem der Druck bezüglich der Wiederverwertbarkeit von Materialien bei der Produktion und nach dem Lebenszyklus immer stärker durch gesetzliche Rahmenbedingungen zu. Celanese ermöglicht mit seinen recyclingfähigen thermoplastischen Materialien ein hohes Potential an Ressourcenschonung und Kosteneinsparungen.

1. ID.3: E-Offensive von Volkswagen

Mit dem ID.3., dem ersten Fahrzeug der neuen E-Generation auf MEB-Plattform, nimmt Volkswagen Fahrt auf. Mit diesem Startschuss bekennt sich Volkswagen klar zum Pariser Klimaabkommen, nach dem der globale Temperaturanstieg bis 2050 auf deutlich unter 2 Grad begrenzt werden soll. Bis 2050 will Volkswagen daher als Unternehmen, d.h. sowohl Fahrzeuge also auch Produktion, komplett CO₂-neutral sein. Nur ein hoher Anteil an E-Fahrzeugen befähigt zur Einhaltung der CO₂-Vorgaben, insbesondere der EU.

E-Fahrzeuge haben über die gesamte Lebensdauer im Vergleich der Antriebsarten die beste Klimabilanz, daher setzt der Volkswagen Konzern mit bis zu 70 geplanten reinen E-Modellen bis 2030 auf die größte E-Offensive der Automobilindustrie. [1]

Der Elektroanteil der Produktion der deutschen Hersteller hat sich seit Anfang 2020 nahezu vervierfacht, auf ca. 20% [2]. Neben der öffentlich diskutierten Ladeinfrastruktur und deren Ausbau, ist der zentrale Faktor der E-Mobilität die Reichweite der Fahrzeuge. Einen Beitrag zur Reichenweitenoptimierung leisten bezahlbare Leichtbaumaßnahmen.

2. Heckklappe in Kunststoff-Metall-Hybridbauweise

Die Kunststoff-Metall-Hybridbauweise der Heckklappe des ID.3 bietet als erste Heckklappe dieser Bauweise im Volkswagen Konzern gegenüber der herkömmlichen Stahlbauweise ein interessantes Leichtbaupotenzial. Ein direkter Vergleich zweier Bauteil-/Designkonzepte mit ist zwar schwierig, lässt sich aber näherungsweise durch einen Vergleich anhand projizierter Bauteilflächen realisieren. Betrachtet man gegenüber der ID.3 Kunststoff-Metall-Hybrid-Heckklappe eine sehr ähnliche Heckklappengeometrie in Stahlbauweise und normiert die projizierten Flächen der Bauteile zueinander, ergibt sich für das Kunststoff-Metall-Hybrid-Konzept ein Leichtbaupotenzial von bis zu ca. 20 %.

Neben dem Gewichtsvorteil bietet diese Bauweise aber noch weitere Vorteile. Eine hohe Designfreiheit, beispielsweise Aussparungen oder aerodynamische Formanpassungen. Es lassen sich zudem Funktionen integrieren z.B. Halterungen und Aufnahmen, die direkt im Spritzgießbauteil abgebildet werden. Da das Metall im Kunststoffbauteil größtenteils gekapselt vorliegt, ist die Korrosionsempfindlichkeit gering. Ein weiterer fertigungstechnischer Vorteil des Kunststoff-Metall-Hybrid-Konzeptes ist die Möglichkeit ein vollständig lackiertes Heckklappenmodul zu fertigen, da im Vergleich zur Stahlbauweise die zu lackierenden Bauteile nicht mit der Rohkarosse zusammen lackiert und erst anschließend komplementiert werden müssen. Aufgrund der im Vergleich geringeren Investitionen können je nach Stückzahlszenario mit der Kunststoff-Metall-Hybrid-Bauweise Kosten eingespart werden.

Aufbau

Die folgende Abbildung **Bild 1** zeigt den grundsätzlichen Aufbau der Heckklappe des ID.3. Die Einzelbauteile sind dabei mit einem 2K-Strukturklebstoff (aus Polyurethan) verklebt.

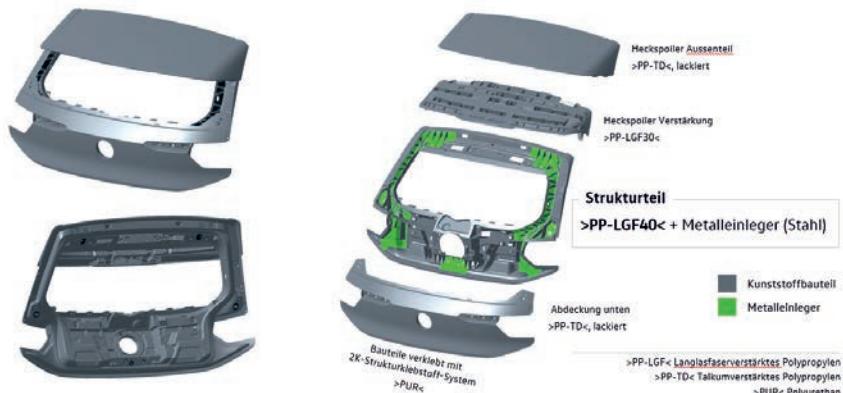


Bild 1:Aufbau der Heckklappe

Herausforderungen Strukturteil

Die maßgeblichen Herausforderungen bei der Konzeptionierung, den Eigenschaften und der Prozessführung des eingesetzten Strukturteils sind im Folgenden aufgeführt. Die Anforderungen sind dabei in drei wesentliche Bereich unterteilt und zusammengefasst.

Kunststoff-Metall-Hybrid

- Hohe mechanische Bauteilanforderungen (Steifigkeit, Torsion)
- Zähigkeit/Crashbeständigkeit
- Hohe Wärmeformbeständigkeit
- Geringe Wärmeausdehnung
- Kompatibilität der Metallverstärkung
- Geringe Kriechneigung
- Geringer Verzug

PP-LGF40 im Sichtbereich

- Hoher Glasfaseranteil (Mechanik)
- Glanzgrad- und Farbeinstellung
- UV-Stabilität
- Gute Geruchs- und Emissionseigenschaften

PP-LGF40 verkleben

- Vorbehandlung der Klebeflächen notwendig
 - Reinigung (Isopropanol)
 - Oberflächenaktivierung Polypropylen (Plasma/Beflammen)
 - Vollautomatisierter Klebstoffauftrag (2K-Strukturklebstoff, dynamisch gemischt)
- Wechselwirkung mit Stabilisatoren

3. Celanese Engineered Materials – Celstran® LFRT (Celanese GmbH)**3.1 Materialanforderungen**

Von VW wurde die Anfrage an Celanese gestellt, ein Material für die Heckklappe des neuen ID.3 zu entwickeln. Die Anforderungen wurden übermittelt und waren sehr herausfordernd. Sie sind in **Bild 2** dargestellt.

APPEARANCE

- Good Surface Appearance with Grained Surface
- Color Match, Gloss Level, Scratch Resistance

MECHANICS

- Crash Behavior
- Strength + Stiffness
- Low Warpage

GLUEING & METAL INSERTS

- Low Dimensional Changes over Temperature Range
- CLTE Near to Metal
- Heat Aging 120 °C
- Heat Aging 150 °C

INTERIOR

- Odor & Emissions
- UV Performance

source: Volkswagen Newsroom

external Celanese Corporation

Bild 2: Anforderungen an das Struktur-/Sichtteil der ID.3 Heckklappe

Bei der Heckklappe handelt es sich um ein Sichtteil in Wageninnenraumfarbe. Die Oberfläche sollte eine neue Narbe erhalten, die bisher noch nicht bei VW verwendet wurde. Neben der guten Oberfläche und der Wageninnenraumfarbe sollte das Material einen niedrigen Glanzgrad und eine gute Kratzbeständigkeit aufweisen. Bisherige Heckklappen waren in Metall und die tragende Struktur sollte in diesem Fall in Kunststoff realisiert werden. Dies beinhaltete die Crash-Anforderungen aber auch Steifigkeits- und Festigkeitsvorgaben, wie auch einen geringen Verzug und ein geringes Kriechen bei Dauerlast und erhöhter Temperatur. Um das zu gewährleisten, waren Metalleinleger vorgesehen, die umspritzt

werden sollten. Daneben sollte die tragende Struktur der Heckklappe mit dem Träger des Spoilers verklebt werden. Hierfür waren eine geringe thermische Ausdehnung und ein Ausdehnungskoeffizient möglichst ähnlich demjenigen von Metallen erforderlich. Die Bauteile sollten bis 120 °C getestet werden und das Material bis 150°C beständig sein. Da sich der Sichtbereich im Wageninneren befindet, mussten die Geruchs- und Emissionsanforderungen für den Wageninnenraum erfüllt werden. Zuletzt muss der Sichtbereich die notwendige UV Beständigkeit aufweisen.

3.2. Materialauswahl

Im Kunststoffbereich besitzt Celanese eines der breitesten Materialportfolios auf dem Markt. Dies beinhaltet teilkristalline Thermoplaste von Polypropylen, POM, Polyester, Polyamide über Hochtemperaturthermoplaste PPS und LCP bis hin zu PEEK. Daneben ist Celanese ein Spezialist sowohl für Kurzfaser- wie Langfaser verstärkungen. Auch thermoplastische Elastomere und amorphe Thermoplaste stehen zur Verfügung (Bild 3). Insbesondere sind die Sustainability- und Recycling-Materialien in Bild 3 grün hervorgehoben, bei denen Celanese ein Angebot im Portfolio hat.

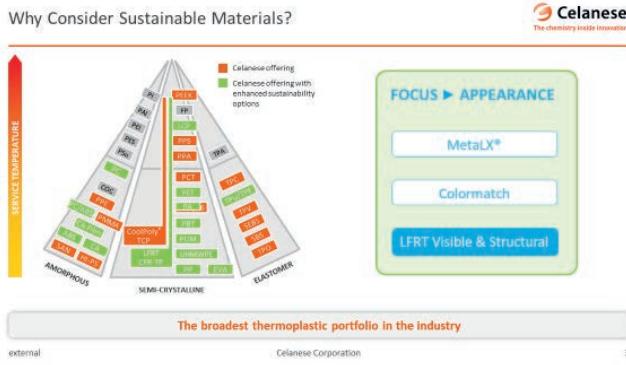


Bild 3: Celanese besitzt eines der breitesten Material Portfolios im Bereich der Kunststoffe. Focus-Thema „Appearance“ mit der Kombination von Struktur- und Sichtbauteilen mit Langfaser verstärkten Thermoplasten.

Deshalb war es möglich, hier ohne Einschränkungen die beste Materiallösung anzubieten. Zusätzlich ist ein Focus bei Celanese die Unterstützung von Sichtoberflächen, beispielsweise im Bereich „MetaLX®“, „Farbnachstellungen“ und der „Kombination von Sicht- und Strukturbau teilen mit langfaser verstärkten Thermoplasten“. Schnell war klar, dass das letzte

Focus-Thema hier die größte Aussicht auf Erfolg haben würde. Für die gute Oberfläche bei Langfaser verstärkten Thermoplasten spielt die vollständige Faserimprägnierung der Langfaserthermoplaste eine entscheidende Rolle. Dies wird bei Celanese mit der Pultrusionstechnologie erreicht (**Bild 4**).

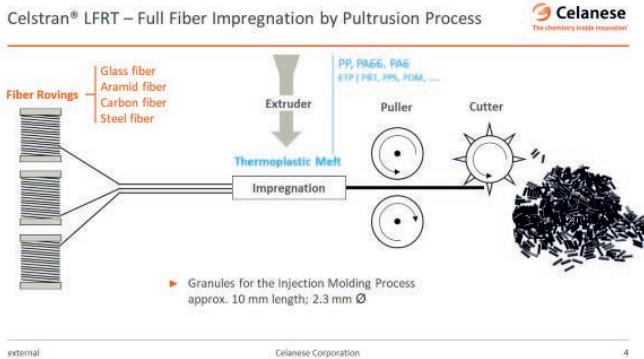


Bild 4: Pultrusion zur Herstellung von Celstran® LFRT und vollständigen „Imprägnierung“ der Fasern

Die Entwicklung von einem Kurzfaserpellet, über eine „Kabelummantelung“ bis hin zu einem vollständig „imprägnierten“ Langfaserpellet ist in **Bild 5** schematisch dargestellt.

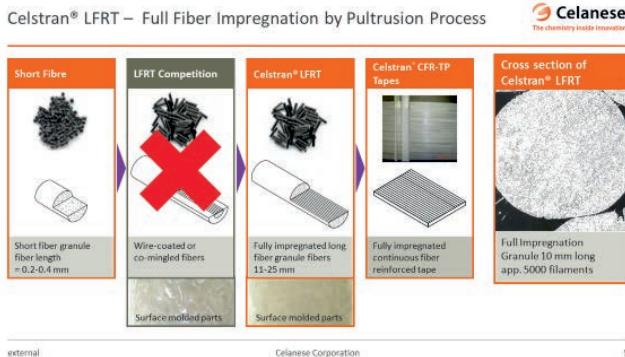


Bild 5: Vollständige Imprägnierung bei Langglasfaser Pellets (schematische Darstellung: Kurzfaserpellet, „Kabelummantelung“, vollständig „imprägniertes“ Langfaserpellet bis hin zur Tape-Herstellung) und Querschnitt durch ein vollständig „imprägniertes“ Pellet und erzielte Oberflächengüte.

Um die mechanischen Anforderungen hinsichtlich Steifigkeit, Festigkeit und Crash (Schlagzähigkeit) zu erfüllen, war ein Polypropylen mit einem Glasfasergehalt von 40 % erforderlich. Auch der geringe Ausdehnungskoeffizient nahe dem von Metallen konnte mit dieser Materialauswahl erfüllt werden. Eine besondere Herausforderung stellte die thermische Beständigkeit in Kombination mit dem UV Schutz und den Geruchs- und Emissionsanforderungen dar. Hierfür mussten die bestehenden Rezepturen überarbeitet und eine angepasste neue Rezeptur erstellt werden. Die Ergebnisse der Entwicklungen sind in **Bild 6** dargestellt.

ID.3 Tailgate - Demanding Requirements

 Celanese

APPEARANCE

- Good Surface Appearance with Grained Surface
- Color Match, Gloss Level, Scratch Resistance
- Fully impregnated long fibers with special color development

MECHANICS

- Crash Behavior
- Strength + Stiffness
- Low Warpage

PP-LGF 40

GLUEING & METAL INSERTS

- Low Dimensional Changes over Temperature Range
- CLTE near to metal
- Heat Aging 120 °C
- Heat Aging 150 °C
- PP-LGF 40 with special developed heat aging package

INTERIOR

- Odor & Emissions
- UV Performance

Formulation for interior applications -0453, -0455 and specially developed UV package

Source: Volkswagen Newcomer

external Celanese Corporation 10

Bild 6: Zusammenfassung der Materialentwicklung für die ID.3 Heckklappe.

Die Serienmaterialien sind in **Bild 7** dargestellt. Für die Heckklappe wird ein Celstran® LFRT PP-GF 40-0455 SOUL 4PK eingesetzt. Für den Träger des Heckspoilers sind keine Sicht- und damit auch keine UV-Anforderungen vorhanden. Zusätzlich ist ein Glasfasergehalt von 30 % ausreichend. Aus diesem Grunde konnte hier ein high-performance Produkt für Strukturteile in Schwarz von Celanese eingesetzt werden.

SUMMERY: ID.3 - Tailgate Material Selection



Source: AZMAGI

external

Celanese Corporation

11

Bild 7: Materialauswahl für Träger Heckklappe und Heckspoiler**3.3. Ausblick**

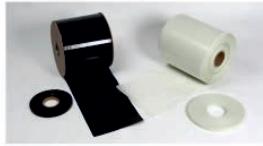
Für die Zukunft stellt die in **Bild 3** zusätzlich dargestellte Möglichkeit der endlosfaser Tape-Produktion ein immenses Potential dar.

OUTLOOK

Celstran® CFR-TP Tapes as Local Reinforcement or Insert



Celstran® CFR-TP Tapes



Additional Potential for E-Mobility:

- ▶ Battery Housing Reinforcement
- ▶ Frontends
- ▶ Seating



external

Celanese Corporation

12

Bild 8: Celstran® CFR-TP Endlosfaser-Tape Verarbeitung als „Lokale Verstärkung“ in der Griffsschale eines Türinnengriffes

Celanese besitzt umfangreiches Know-how in der Celstran® CFR-TP Tape-Herstellung. Die Tapes können einlagig z. B. als „lokale Verstärkung“ (typ. 0,25 mm Dicke, **Bild 8**) oder mehrlagig (z. B. 4 Lagen typ. 1 mm Dicke) als „Insert“ eingesetzt werden. Ziel hierbei ist es, die Metalleinleger zu ersetzen und damit Gewicht und Kosten zu sparen. Die Tapes sind dann entsprechend aus einem Polypropylen mit 70 % Glasfasern unidirektional mit Endlosfasern

verstärkt. Bei mehrlagiger Verarbeitung können verschiedene Legewinkel (z. B. 0 Grad/ 90 Grad oder 0 Grad/ 45 Grad) realisiert werden. Da die Tapes das gleiche Matrixpolymer besitzen wie das Spritzgussmaterial, wird insbesondere bei der „Lokale Verstärkung“ ohne Vorbehandlung eine Einheit mit dem Spritzgussmaterial gebildet. Die Tapes sind dann untrennbar mit dem Spritzgussmaterial verbunden.

Quellen:

- [1] Volkswagen AG, www.volkswagen-newsroom.com, 01.06.2021, ID. INSIGHTS Sustainable E-Mobility, Februar 2019
- [2] VDA 2021, www.vda.de, 20.05.2021

Breakthrough in producing soft and sustainable interior surfaces by injection moulding of TPE

Dr.-Ing. Thomas Köppl, Florian Dresel, Norbert Grohnmeier,
HEXPOL TPE GmbH, Lichtenfels

Abstract

Several processing methods and materials exist to produce soft-touch interior surfaces like instrument panels and door trims. However, they can be costly, and the materials are not recyclable. OEMs need to improve sustainability while also limiting system costs. It is now possible to produce large scale surfaces by injection moulding of the new high-flow thermoplastic elastomers Dryflex® HiF. TPE are already the material of choice for many interior applications due to their processability and adjustability.

However, until recently, TPE have not been viable for large-scale trim applications (e.g., instrument panels) because they have much higher requirements regarding abrasion behaviour, processability and heat resistance. These new TPE are injection mouldable and fulfil the typical requirements of these demanding parts. Therefore they are an interesting alternative to existing production methods like PU coating, PVC slush moulding or TPO foil processes. With TPE injection moulding, it is possible to save energy in production, decrease part weight and reduce emissions. Additionally, parts made from TPE can be recycled in closed-loop systems, which supports the need for higher sustainability.

Even very large, thin parts can be produced with injection moulding due to the high flowability of the material. In a production trial, 1.1 mm thin skins for the soft surface of a complete instrument panel were moulded and backfoamed with PUR. The material is currently undergoing final part testing at diverse OEMs and Tiers. Despite their high melt flow, the TPEs pass the especially stringent lightfastness and heat resistance requirements for instrument panels. They also offer an excellent soft-touch haptic, low gloss and a very high scratch-/abrasion resistance.

The ability of TPE to be used in multi-component injection moulding opens new possibilities of direct overmoulding of Polypropylene. Compared to existing TPU or PU-RIM processes often realised with PC/ABS as the hard component, the ability to adhere to PP can deliver further cost and weight reduction in 2K processes.

1. Thermoplastic Elastomers

Thermoplastic elastomers are a special material group because they unite the processability of thermoplastics like PP with the softness and flexibility of elastomers (e.g., SBR, NBR, EPDM). They can be used in injection moulding, extrusion or even foam processes which opens the possibility of various applications summarised later.

TPE can be based on block copolymer structures consisting of hard and soft segments or a blend of different polymers. One of the main advantages of TPE is that their formulation can be easily modified to achieve a tailored material with properties optimised for a specific application. In addition, TPE can be easily recycled in closed-loop systems once the application has reached its end of life. A distinct advantage when compared to products made from vulcanised elastomers.

It is also important to know that TPE is only the umbrella term for numerous subcategories of elastomers with distinct properties. One of the most widely used classes of TPE are styrenic block copolymers (TPS) which are based on copolymers like SBS (Styrene-Butadiene-Styrene) or SEBS (Styrene-Ethylene-Butylene-Styrene). These block copolymers are usually blended with other polymers (e.g. PE, PP), additives and stabilisers to get the finished TPS. Their main advantage is that they cover a wide range of hardness (from Shore 00 to high Shore D) and often offer the most cost-efficient solution for diverse applications. Other types of TPE are thermoplastic polyolefins (TPO) and thermoplastic vulcanisates (TPV) based on olefins like PE and PP. These TPEs are both olefin-based, but TPV are also vulcanised. Nevertheless, TPV can still be processed thermoplastically. They offer improved heat and media resistance due to their vulcanisation, making them a middle ground between standard TPE and vulcanised elastomers like EPDM.

These classes of TPE are all produced in compounding processes, but there are also some made in reactors. These include thermoplastic polyurethanes (TPU) which offer excellent haptic and wear resistance. However, TPU are not suitable for all applications due to their more challenging processing and higher price, especially when UV and hydrolysis resistance is required.

It is also possible to produce TPE based on polyester to get thermoplastic copolymers (TPC) which are limited to higher hardness but offer excellent mechanical recovery (for example, after being bent).

2. TPE in Automotive Applications

In the automotive sector, the usage of TPE is steadily increasing because it offers numerous advantages compared to other materials like rubber or PVC. For example, TPE are often the more sustainable option due to lower density (0.9 g/cm³) and easier recyclability in closed-loop systems. Additionally, extrusion or injection moulding are energy-efficient processes that result in parts that require very little or no post-processing.

Recent innovations in TPE allow the production of materials with very low emissions, which is especially important in the automotive interior. The typical “new car” smell, which was often tolerated in the past, can now often concern customers and OEMs, especially in the Asian market. Less noticeable but maybe even more problematic are volatile organic compounds (VOC) which can lead to headaches and nausea if they are concentrated in the car. Semi-volatile organic compounds (SVOC) can also be a concern because they lead to steamed-up windows, which impedes visibility. Due to this, car manufacturers have increasingly strict regulations regarding vehicle interior air quality (VIAQ). Innovative TPE can pass the strictest emission tests, and their odour is barely noticeable (see Table 1)

Table 1: Testing results of TPE with very low emissions (Dryflex Interior)

Property	Testing standard	Typical requirement	Dryflex Interior
Odour	VDA 270	≤ 3.0	2.0 – 3.0
VOC	VDA 278	≤ 500 µg/g	60 – 120 µg/g
FOG	VDA 278	≤ 2000 µg/g	200 – 600 µg/g
Gravimetric fogging	ISO 6452	≤ 2 mg	0.3 – 0.7 mg

Due to all these factors, TPE are already the material of choice for many automotive applications. For example, in the automotive interior segment, both inlay mats and all-weather floor mats are usually made from TPE due to its easy processing and very low emissions, which is especially important for large scale parts (Figure 1).



Fig. 1: All-weather floormat made from TPE [1]

Standard TPE can be used for multi-component parts with olefinic thermoplastics like PP; it is also possible to modify TPE to achieve excellent adhesion to polar thermoplastics like PA, PMMA, ABS, ASA or PC. By doing this, it is possible to produce soft-touch parts like thumb wheels and directly injected anti-squeak seals. TPE are also used in non-visible areas, for example, as vent flaps in the HVAC system.

In the exterior segment, there are also numerous applications. Visible parts made from TPE include weather seals, wheelhouse liners, mud flaps and diverse trim applications. Here materials need a very high heat resistance and lightfastness to withstand even extreme climates. Closely related to this is air-water management, which includes air duct seals, water/air deflector and the cowl top grill. The lightfastness requirements for these parts are not as high, but it is necessary to have a material with very good processing behaviour and good long-term heat and ozone resistance.

The most challenging segment for TPE is probably under the hood applications due to very high temperature and media resistance requirements. For some applications, TPS is suitable (for example, fasteners and cable clips), but if media resistance against oil or fuel is required, TPV is usually the material of choice. Such applications include grommets and sealings.

In summary, TPE is used across the automotive sector, but some applications were impossible until recently. A prime example is large-scale trim applications like instrument panels and door coverings because they have very high requirements regarding abrasion resistance, heat resistance, lightfastness and processability. Due to this, they are usually realised with cost and energy-intensive processing techniques like PU-RIM or PVC slush. However, with the Dryflex HiF TPE, it is possible to produce even large parts by standard injection moulding. Therefore, to understand the advantage of this type of processing, it is important to consider the currently used processes.

3. Injection moulding of TPE in comparison to existing materials & technologies

Probably the most widely known processing technology for automotive surfaces is PVC slush moulding. In this process, a nickel tool is heated up and then coated with PVC powder. The powder then forms a thin layer on the tool. To achieve a homogeneous thickness, it is necessary to move the tool around to distribute the powder. The excess powder is then removed, and the powder sticking to the tool melts into a thin skin. To demould the skin, the tool needs to be cooled again. While the produced skin can be of very high quality, the method is very energy-intensive, costly and time-consuming due to the alternating cooling and heating of the tool. Cycle times of 5 minutes or more per skin are not uncommon. Additionally, the used material (PVC) inherently has a rather high density, and recyclability is problematic.

Another method to produce such surfaces is PU-RIM (reaction injection moulding), in which two components are injected into the mould where they react in place and form the finished material. However, this process may create short-chained side products, which can contribute to odour and other interior emissions (VOC, FOG). In addition, like PVC, the recycling of polyurethanes is problematic, and the density of the material is relatively high. Depending on the part geometry, post-processing may be necessary (e.g. edge trimming and mould cleaning).

Another option for interior surfaces is TPO foils which offer better recyclability than PU or PVC but also produce a large amount of material waste during production. This is because the TPO foil is shaped over the carrier material, and then all unneeded foil is cut off. Depending on the part geometry, this cut-off can be significant. Compared with these technologies, the injection moulding of Dryflex HiF TPE is a simpler process. As a result, energy and material can be saved, and post-processing can be avoided. This process is also considerably faster than PVC slush moulding with a much lower cycle time (around one minute). This is shown later with the example of an instrument panel skin. Additionally, the recycling of TPE in closed-loop systems is easier when compared to PU and PVC.

4. Application examples

Multiple surfaces in automotive interiors are required to have high durability, pleasant appearance and good haptic. Typical examples are instrument panels, door coverings, centre console trim and glove box lids (Figure 2).



Fig. 2: Interior surface applications, e.g., instrument panels, door and beltline trims, centre console trims, glove box & airbag covers [2]

Probably the most important surface in the automotive interior is the instrument panel. Due to its positioning directly under the windscreens and its long lifetime, the material requirements are very high. Additionally, it is a very large part which makes the processing a significant challenge. In close collaboration with Kraton Corporation and based on their IMSS™ technology, HEXPOL TPE used their long-term compounding experience to develop ready-to-use materials.

In a pilot trial, a full instrument panel skin was injection moulded with Dryflex HiF TPE (Figure 3). This skin can be backfoamed with PU foam and a carrier material made from a hard thermoplastic (e.g., PP). For a good adhesion between the TPE skin, foam and PP carrier, the surface is usually activated by flame-treatment with a gas burner. With this process, it is possible to produce a large-scale surface with excellent surface properties and a soft haptic.



Fig. 3: Instrument panel skin based on Kraton IMSS™ demonstrating the suitability of Dryflex HiF TPE as PVC slush replacement. [3]

It was possible to reduce the cycle time to produce an instrument panel skin down to under 80 seconds. This is several times faster than a similar slush moulding process (usually more than 5 minutes). Another application of Dryflex HiF TPE is the direct overmoulding of a thermoplastic substrate in multi-component applications. In such a process, no backfoaming is done, which further reduces the cycle time for the finished component. Application examples are a glove box cover or a door panel from PP directly overmoulded with the TPE. Compared to slush moulding, this process is much faster and uses less energy. 2K moulding would also be possible with TPU, but this requires a polar thermoplastic as the substrate, which is typically more expensive than PP.

5. Testing results

Interior surfaces are among the most extensively tested parts in automotive interiors because they are subject to numerous stresses like intensive heat, UV light and mechanical load (e.g. scratching).

5.1 Heat and UV resistance

One of the most critical aspects for parts is long-term heat resistance. This is especially important if the part is located directly under the windscreen or close to it. For example, if the car is parked in direct sunlight, a black surface underneath the windscreen can rise to 120°C. Dryflex HiF TPE was tested at this temperature for 1000 hours. After this time, the hardness and tensile properties showed a marginal change. Also, colour and gloss change are within typical specification. This indicates no material degradation even after long-term exposure to 120°C, which is the highest temperature requirement for interior applications.

Of course, the finished part is also subjected to direct sunlight which is usually simulated with Xenon testing. The exact testing standard varies depending on OEM and application, but a commonly used method is ISO 105-B06 which exposes a black surface to 100°C with 50 W/m²/nm. After 4 cycles with 980 kJ/m² in total, Dryflex HiF TPE showed only a very slight change in colour, which corresponds to a grey scale rating of 4.5. This means that the material is suitable for applications that are heavily exposed to light.

5.2 Odour and emission performance

Another important aspect for interior parts is their emission behaviour regarding odour and volatile substances. The exact specifications and requirements regarding odour vary depending on application and OEM, but generally, the material odour must not be disturbing even at higher temperatures (e.g. 80°C). The odour of Dryflex HiF TPE was tested at very high temperatures (>100°C) and was found to be not objectionable for interior applications.

To evaluate a materials emission behaviour, it is also necessary to look at semi-volatile substances which might not necessarily have an odour but might condensate on the windows (fogging). This is important because steamed-up windows can be a safety hazard due to impeded visibility. Therefore, the fogging behaviour of Dryflex HiF TPE was tested both reflectometrically and gravimetrically according to ISO 6452. Both tests showed good results within the typical OEM specifications (1.0 mg condensable constituents in gravimetric fogging and a fogging index of 86% in reflectometric fogging).

5.3 Scratch and abrasion resistance

For exposed surfaces, a durable material that can withstand scratches, abrasion and occasional contact with different media is needed. While the exact surface texture varies on application and OEM, the most used surface structure is still some type of leather grain. Due to this, the mechanical testing of Dryflex HiF TPE was done on a leather grain. Some examples of those scratch and abrasion tests are given in the following.

One of the most widely used scratch tests is a single scratch with a defined scratching tip (e.g., Bosch tip with 0.75 mm diameter) and a specific force (Figure 4). The force is then gradually increased with each new scratch until a defect is seen. With a 0.75 mm tip a significant force of more than 5 N is required to make a visible defect in Dryflex HiF TPE.

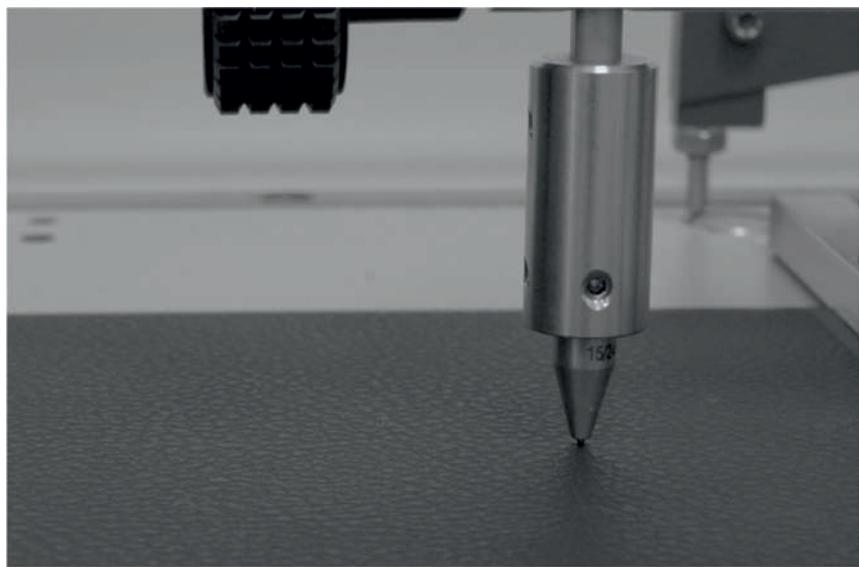


Fig. 4: Scratching with 0.75 mm tip across a leather grain made from Dryflex HiF TPE

To get a closer simulation of scratching with a fingernail, sometimes a scratching wheel made from PMMA is used. Such a wheel is a bit broader than the scratching tip and produces a different type of scratch. In this type of test, the applied force needs to be even higher to produce significant surface defects, showing a good scratch resistance of the material.

The abrasion behaviour of Dryflex HiF TPE was also tested with multiple methods. One of those is a Taber abrasion test in which the material is abraded with a defined testing head and

number of cycles. In this test, according to SAE J948 (CS-10), Dryflex HiF TPE showed only very little change after 250 cycles. Similar behaviour can be observed in Crockmeter tests (ISO 105-X12), in which a weighted testing cloth is rubbed across the surface (10 cycles).

5.4 Media resistance

It is also important that the material is resistant to typical hand lotions that might contact the surface. Usually, sunscreen lotion is the most critical because it tends to stain the surface. Due to this, the resistance of Dryflex HiF TPE to sunscreen was tested. The material received a grey scale rating of 4.5 both at room temperature and at 74°C, which means that the sunscreen lotion produces almost no stain at all, even at elevated temperatures.

These durability tests prove that Dryflex HiF TPE is a very resilient material which can be used for all kinds of surface in the automotive interior even if considerable stresses are applied.

5.5 Compatibility to PU foam and Polypropylene

It has also been shown that Dryflex HiF TPE can be combined with PU foams after flame treatment which creates a soft haptic and pleasant touch (Figure 5). The peel resistance was tested directly and after backfoaming and after heat ageing in roll peel tests.

In 2 K moulding cohesive adhesion to nonpolar thermoplastics, e.g. Polypropylene is possible.

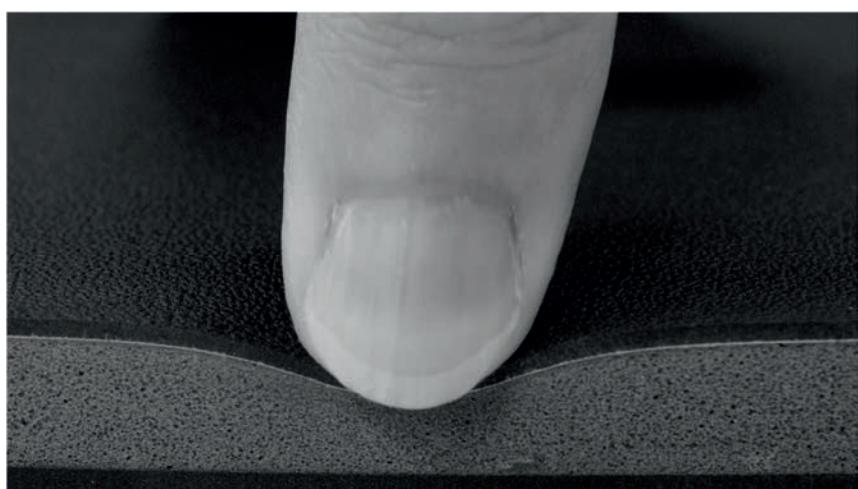


Fig. 5: Dryflex HiF TPE skin with backfoamed PUR and PP carrier

6. Summary

In conclusion, Dryflex HiF TPE offers an excellent opportunity to shelve inefficient manufacturing processes and improve the sustainability of the finished part while also saving costs. Compared to older processes like PVC Slush, PU-RIM or PVC or TPO Foils, injection moulding of Dryflex HiF TPE offers a weight saving of up to 25%, better recyclability, less post-processing and improved emission behaviour (cf. Figure 6).

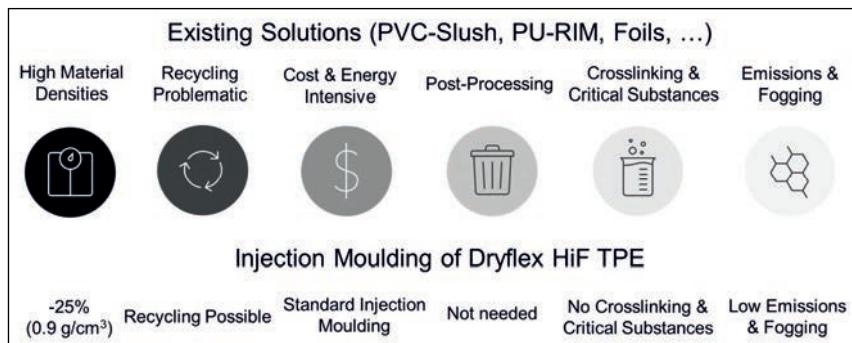


Fig. 6: Existing solutions for producing interior surfaces and advantages of Dryflex HiF TPE injection moulding.

For a further improvement of the sustainability, it is also possible to foam the TPE itself, for example, in a MuCell® process with a physical blowing agent. This eliminates the rather cost-intensive PU foaming processing and improves the recyclability due to the then fully thermoplastic system of the interior panel.

References:

- [1] HEXPOL TPE/iStock.com Milos Jaksic
- [2] HEXPOL TPE/iStock.com eclipse_images, hikmetyildiz, deepblue4you, RFarrarons
- [3] Kraton Corporation

The all-new MAN high-roof cab – epoxy sandwich RTM – simulated using FEM and crashed under real conditions

Dipl.-Ing. (FH) **Andreas Schmitz**, MAN Truck & Bus SE, Munich

Abstract

This article describes the development and design of the new high-roof generation from MAN. Customer requirements have changed and legal requirements such as crash guidelines and CO₂ limits have been raised significantly. To meet these new requirements, MAN decided to develop the new high-roof for its top-of-the-range GX long-distance cab, which offers maximum comfort.

In addition to geometric changes that improve comfort and optimize the c_w -value, compliance with the ECE R29-3 Crash Directive, which came into force in 2021, presents the greatest challenge. The loads required by the new crash directive ECE R29-3 have been significantly increased from those in the previous directive.

The article describes the benefits of the chosen material and the collection of the data needed for design using simulation. Finally, the comparison of the simulation with real component and crash tests is shown. The goal was to demonstrate to the approval authorities by means of a very precise simulation that simulated comparisons are a sufficient basis for future type approvals for vehicle type changes and that no expensive real crashes are required for release.

1. MAN high roofs

In its portfolio MAN Truck & Bus SE has for the long-distance trucking segment three cabs with high-roof bodies: a cab 2240 mm wide with a medium-high roof (TM), a cab 2440 mm wide with a medium-high roof (GM) and a cab 2440 mm wide with an extra-high roof (GX). All three cabs have the same length. In MAN's new vehicle generation, the high roof of the GX has been replaced by a new high roof, as described below. The two medium-high roofs have been modified and will continue to be mass-produced; Fig. 1.



Fig. 1: TM cab

GM cab

GX cab

This high-roof system has been installed in series production at MAN since 1999. MAN can thus look back on more than 600,000 high roofs so far manufactured in the TG series. The surfaces of the outer and inner shells when unfolded come to an area of about 6.2 km^2 – this corresponds to about 800 football fields according to FIFA standard.

The new GX high roof replaces the XXL roof, which has been manufactured since 1999. This cab with the large panoramic windscreens and the lateral fixed glazing above the cab doors caused a sensation at market launch. Such a light-flooded interior did not exist in the truck sector at that time. In the meantime, the requirements for more storage space and reduced heat input into the cab have increased and the large window surfaces stand in the way of these requirements; Fig. 2.

By dispensing with the large windscreens and the new geometric design of the roof, a storage space volume of around 403 liters could be realised in the new luggage rack above the windscreens, thereby representing the best value in the competitive environment. Compared to the predecessor model it was possible to reduce the c_w value further.

The following requirements applied to high-roof development:

- Compliance with crash directive ECE R29-3, concomitant with the cab shell
- Cost optimization
- Maximum storage space → BID (best in dimension)
- Maximum headroom
- Improved energy efficiency (reduction of window areas)

- Improvement of the c_w value
- Optimization of weight (-10% compared to the predecessor)
- Optimization of water management
- Direct connection of the upper bunk to the roof

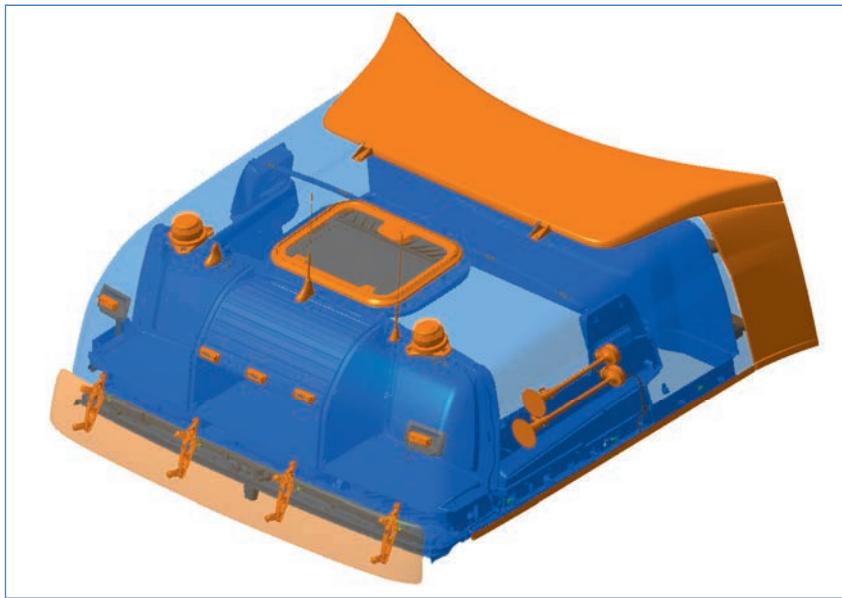


Fig. 2: XXL high roof with all external and internal attachments

2. ECE R29-3 crash directive

Since 31st January 2021 the new ECE R29-3 crash directive has applied to all new registrations of commercial vehicles. This is considerably stricter than the previous crash directive ECE R29-2. In particular, the roof load test C is now carried out in two stages, one dynamic (C1) and the other static (C2), in contrast to a purely static loading in ECE R29-2; Fig. 3. The cab is thus first subjected to a dynamic load of 17.6 kJ by a pendulum and then the pre-damaged cab is subjected to a static load of 9.8 kN. After the test, the dummy is placed in the driver's seat (unlike the car, where the dummy is in the vehicle during the crash). In this sitting position, the dummy must not be touching any component. Nor may any larger components that could injure the occupants come loose in the cab. This new test definition better reflects reality, as it simulates a tipping over or a rollover of the truck.

The frontal impact Test A was racked up by 11 kJ to 55 kJ – in other words, the energy input to be reduced was 25% greater. The new Test B, which describes a barrel impact of 29.4 kJ on the A-pillars, replaces the old rear wall test, in which a static load of 70 kN was applied to the cab rear wall; Fig. 3.

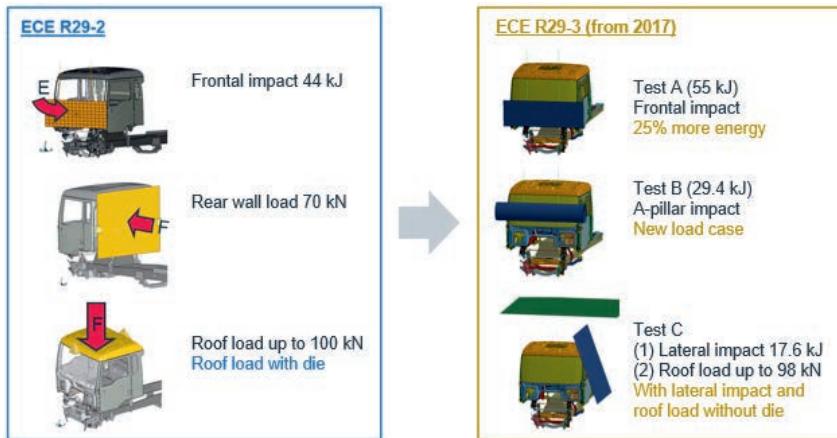


Fig. 3: Changes in the crash directive from ECE R29-2 to ECE R29-3

3. Facts about the high roof

The new high roof measures 2326 x 2016 x 770 mm, which corresponds to a total laminate surface of 17.25 m². The weight of the part as a raw component is 81.4 kg. The fiber composite structure thus fully exploits its lightweighting potential compared to a high roof made of sheet metal, delivering a weight reduction of 30 to 35%; Fig. 4.

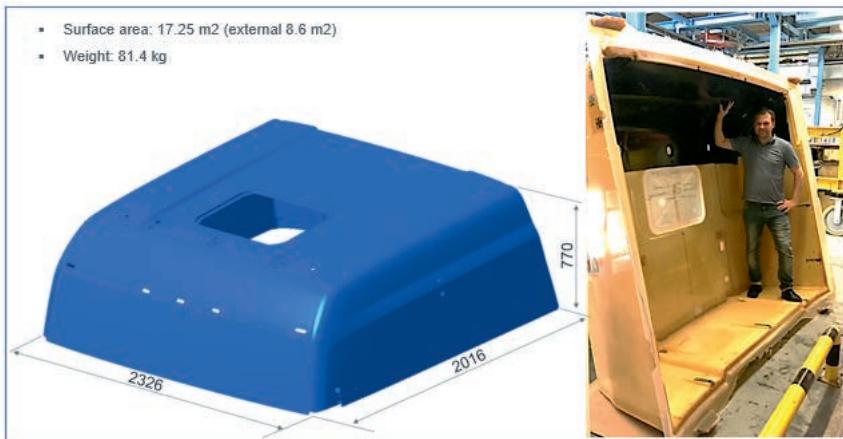


Fig. 4: GX high roof figures

4. Structure/epoxy sandwich RTM process

The structure of the high roof in epoxy sandwich technology is shown in Fig. 5 with the aid of a section. In principle, a minimum total wall thickness of 20 mm is sought, but this is in some cases even exceeded or undershot. In certain areas, the inner and outer top-layer laminates, which are each about 1.5 mm thick, are merged and then form a monolithic layer with a wall thickness of about 3 mm. Components such as antennas, the roof hatch or aero package components can then be attached in these areas.

The foam-molded PUR foam blanks with a density of 120 kg/m³ (Fig. 6) are simply covered with glass fiber mats with a weight per unit area of 650 g/m². Depending on the load case, additional fiber-glass layers are sometimes added. The covered foam cores are then inserted into the cavity half of the tool. Once the mold is closed, the epoxy resin is injected. After a curing time of around 20 minutes, the component can be demolded and sent for further processing. Fig. 7 describes the manufacturing process.

For the connections that require direct attachment to the high roof, sheet metal inserts are used which are foamed into the foam core. In addition, the opportunity is also taken to insert glass-fiber-reinforced epoxy resin blocks into the foam cores. These blocks make an excellent connection to the two top-layer laminates, so that under loading both top-layer laminates are subjected to force. The blocks are thus used to connect to the roof highly stressed components such as the upper bunk or aero package parts.

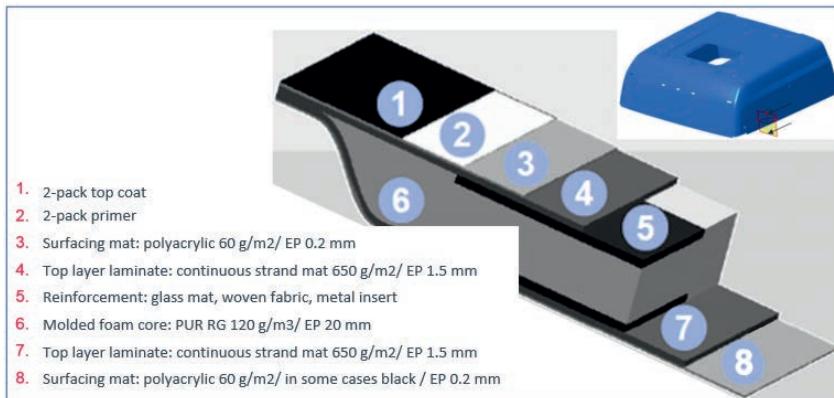


Fig. 5: Structure of the layers

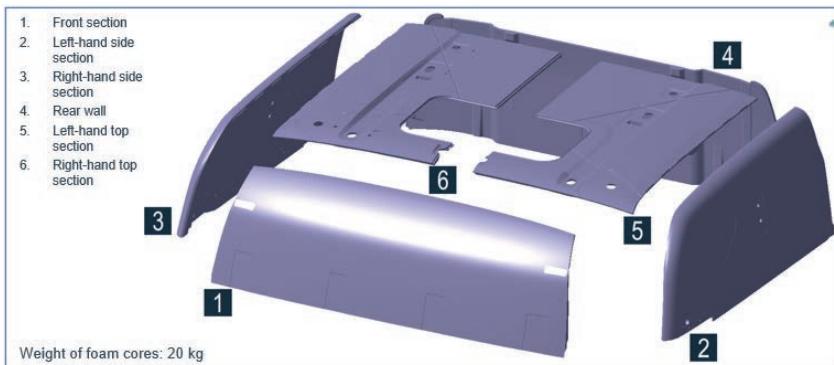


Fig. 6: Foam core divisions

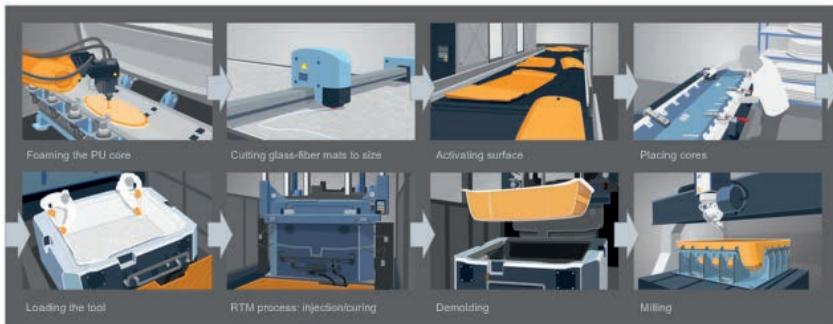


Fig. 7: Manufacturing process for the high roof by the RTM method

5. RTM tool

The special feature of the RTM tool lies in the structure of the surface layer. This layer which is at least 20 mm thick consists of 99.9% nickel and is deposited by chemical condensation from $(\text{Ni}(\text{CO})_4$) in a vacuum furnace onto an oil-heated so-called mandrel and forms a very resistant layer. The ribbed substructure made of steel results in a 22.4 t tool that is relatively light for this size.

The long service life of the tool with more than 200,000 pieces produced is a major advantage of this design. The high dimensional accuracy and dimensional retention over and beyond the temperature changes and the tool life speak in favor of this process. A good heat transfer coefficient is a further advantage for efficient temperature control of the tool.

6. Comparison between simulation and real tests

In order to be able to carry out an accurate simulation that is comparable to a real crash, a precise review of the affordability of the materials used is required. For this purpose, the medium-height GM high roof, which is already in series production, was used as a reference and very carefully examined. Sample pieces were taken and the following quasi-static test series were carried out:

- Tensile test
- Tensile/compression test
- Shear test
- 4-point bending test without shim
- 4-point bending test with shim
- C2 preliminary tests

On this basis, material cards could then be drawn up, which formed the basis for the first simulations. The individual tests – see for example the 4-point bending test in Fig. 8 or the shear test in Fig. 9 – were then adjusted in the FEM calculation and deviations corrected.

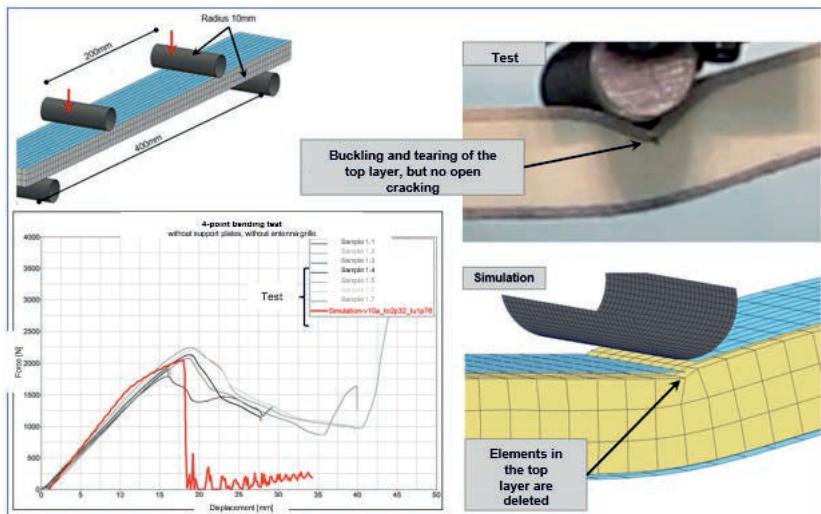


Fig. 8: Sandwich composite: validation of shear test and 4-point bending tests without sheet metal

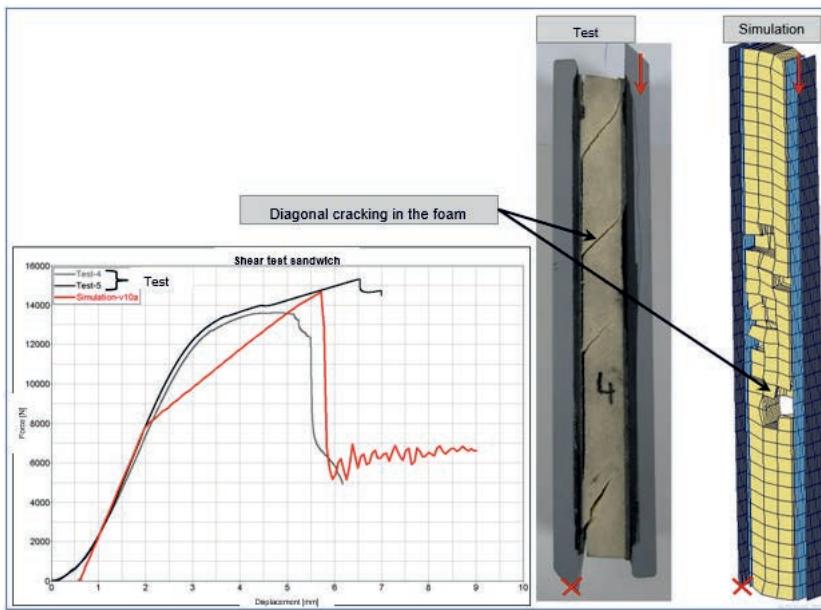


Fig. 9: Sandwich composite: validation of the shear test

The simulation was set up with all details; Fig 10. The outer and inner shells, the so-called laminate, the foam core and all glass fiber doublings, metal inserts, openings and holes were simulated.

The calculations are carried out with LS-Dyna. Running through the complete C1/C2 test program takes eight days with eight CPUs and with prioritized computation and available capacity four days with 16 CPUs. This means that the results of variant calculations with the corresponding lead time for networking can be obtained much more quickly than those from comparable real crashes.

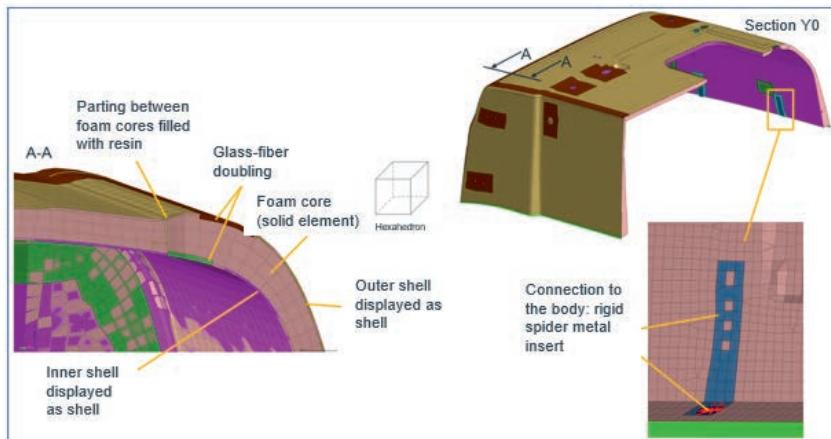


Fig. 10: Structure of the models for simulation

In the next step, a cab with a GM roof was rigidly anchored to the ground and a load was gradually applied until the structure failed. This was intended to simulate test C2 without the previous damage from test C1 since test C1 cannot be readily set up and repeated at short notice. After about 133 kN, a failure of the roof at the C-pillar appeared in that the roof tore open vertically. A decisive role is played here by the body giving way in the area of the shaft for the raw air intake since the roof is no longer supported here; Fig. 11.



Fig. 11: First component test with anchored body

A disadvantage of this simplified test is that the entire load is introduced into the structure via the C-pillar and thus this load in the area of the C-pillar is much greater than the real load in test C2.

It was already possible at this time to show this disadvantage in the simulation and visualize the damage relatively well in the comparison.

For this reason, a component test was developed that only includes a part of the cab body. Here the roof surface is horizontal and thus parallel to the plate which distributes the applied test force evenly over the roof surface. Behavior in the component test is thus similar to that in the real test. In the test under real conditions, when force is applied the cab is first pressed into the rear support and thus the load is introduced almost evenly into the structure. The influence of the windscreens was simulated by a glued-in aluminum panel; Fig. 12.



Fig. 12: Simplified component test with roof aligned to the test force

Direct screw-on points in the high roof were simulated and confirmed in the test. Here, glass-fiber-reinforced epoxy resin blocks were inserted into the foam core and embedded in the RTM process. These cores effect a very good connection between the outer and inner laminates, have a very high tear-out force and give rise to significantly fewer surface markings than do the sheet metal inserts used to date. After 10,000 cycles of dynamic loading no damage could be detected and a tear-out force of about 10 kN was demonstrated. This is far higher than the required tear-out force. Fig. 13 shows the testing of the connection of the upper bunk, once in the complete roof and once in roof sections. Various embodiments with and without pre-aging could be tested here.



Fig. 13: Testing the bunk connection in the cab, and on cab sections (new and aged)

The test set-up in Fig. 14 was used, among other things, to check the load occurring during rear-facing transportation on a railcar. Here, very high forces on the aero package can occur when trains cross in a tunnel, these corresponding to a wind speed of 250 km/h – the speed of a Formula 1 racing car, so to speak. Here, too, after a damage-free test cycle, a load until failure was applied, which was much higher than that required.



Fig. 14: Testing the aero package connection (new and aged); rear-facing transportation on a railcar

From various simulation loops and test series, the real tests could finally be predicted very well in the simulation. In addition to the component tests, in which we were able to recreate the comparison with and without additional reinforcements, these findings were then also confirmed by severe real crashes. The acceptance crash could then be predicted beforehand 1:1 in the simulation. Fig. 15 shows a B-pattern pre-crash according to C1 from July 2017.

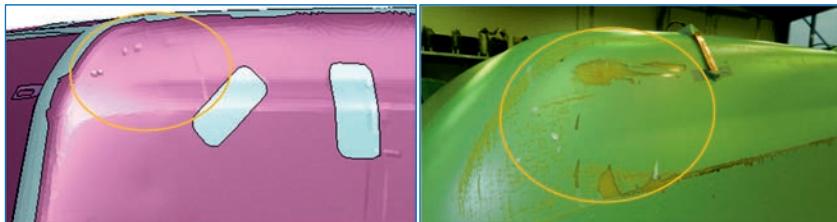


Fig. 15: Comparison simulation to B-pattern – real crash July 2017 according to C1

Fig. 16 shows a B-pattern pre-crash according to C2 from October 2017 in comparison with the simulation. Here it is easy to see that the cracking at the rear left edge of the roof could be well predicted. Also from this pre-crash comes Fig. 17 in which the buckling of the roof in the area of the lowering of the shell is very visible in the comparison.

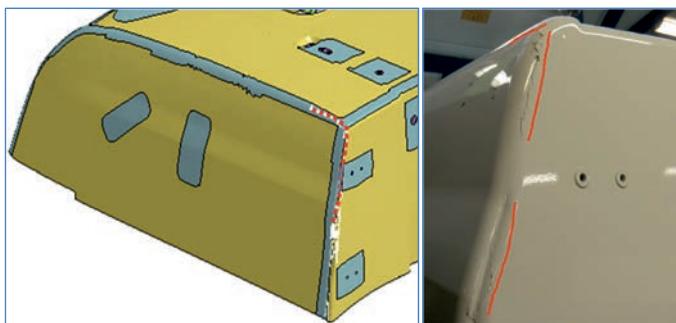


Fig. 16: Comparison simulation to B-pattern – real crash October 2017 according to C2

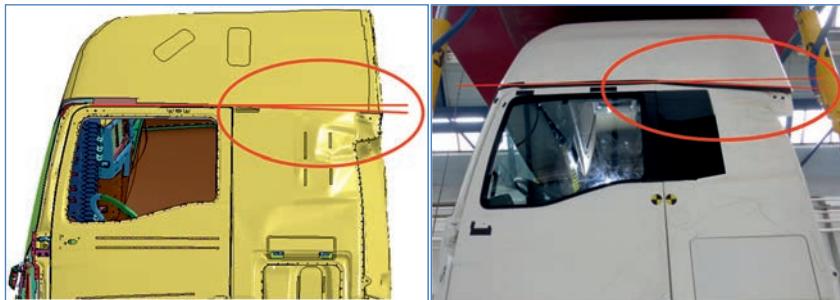


Fig. 17: Comparison simulation to B-pattern – real crash October 2017 according to C2

7. Summary

Through extensive and sometimes unconventional test series, MAN has succeeded in raising the comparison between simulation and real crash to a quality level in which we are able to use the simulation for making changes in geometry, in the layer structure or in the incorporation of trimming in order to confirm the development goals.

The goal, in addition to convincing the homologation authorities, of inputting changes into series production via simulation without having to carry out extensive and expensive real crash series has already been achieved, depending on the complexity of the change.

Epoxid-Sandwich-RTM - FEM gerechnet und real gecrasht

Dipl.-Ing. (FH) **Andreas Schmitz**, MAN Truck & Bus SE, München

Kurzfassung

Dieser Beitrag beschreibt die Entwicklung und Auslegung der neuen Lkw-Hochdachgeneration von MAN. Die Anforderungen der Kunden haben sich geändert, gesetzliche Anforderungen wie Crashrichtlinien und CO₂-Grenzwerte wurden deutlich verschärft. Um diesen neuen Bedürfnissen gerecht zu werden, entschied sich MAN für die Entwicklung des neuen Hochdaches für Ihr Topprodukt, das Fernverkehrsfahrerhaus GX, das maximalen Komfort bietet.

Neben geometrischen Änderungen am Hochdach die den Komfort verbessern und den c_w-Wert optimieren, stellte die Erfüllung der ab 2021 in Kraft getretenen ECE R29-3 Crashrichtlinie die größte Herausforderung dar. Die in der neuen Crashrichtlinie ECE R29-3 geforderten Lasten wurden im Vergleich zur Vorgänger-Richtlinie deutlich erhöht.

Dabei werden die Vorteile des gewählten Materials und die Erhebung der Daten, die zur simulierten Auslegung benötigt werden, dargestellt. Abschließend wird der Abgleich der Simulation mit realen Komponenten- und Crashversuchen aufgezeigt. Das Ziel war, durch eine sehr genaue Simulation den Genehmigungsbehörden zu demonstrieren, dass bei zukünftigen Typänderungen simulierte Vergleiche eine ausreichende Basis für Typgenehmigungen der Fahrzeuge darstellen und teure Realcrashes zur Freigabe deutlich reduziert werden.

1. MAN Hochdächer

MAN Truck & Bus SE hat für das Lkw-Fernverkehrssegment drei Kabinen mit Hochdachaufbauten im Portfolio. Dabei gibt es eine 2240mm breite Kabine mit mittelhohem Dach (TM), eine 2440mm breite Kabine mit mittelhohem Dach (GM) und eine 2440mm breite Kabine (GX) mit einem extra hohen Dach. Alle drei Kabinen haben dieselbe Länge. In der neuen Fahrzeuggeneration von MAN wurde das hohe Dach des GX durch ein neues Hochdach, wie nachstehend beschrieben, ersetzt. Die beiden mittelhohen Dächer wurden modifiziert und werden weiter in Serie produziert, Bild 1.



Bild 1: Fahrerhaus TM

Fahrerhaus GM

Fahrerhaus GX

Dieses Hochdachsystem wird bei MAN seit dem Jahr 1999 in Serie verbaut. So kann MAN auf bisher über 600.000 gefertigte Hochdächer der TG-Baureihe zurückblicken. Die abgewickelten Flächen der Außen- und Innenschalen kommen auf circa 6,2km² Fläche, dies entspricht circa 800 Fußballfeldern nach FIFA-Norm.

Das neue Hochdach GX löst das seit 1999 gefertigte XXL- Dach ab. Dieses Fahrerhaus mit der großen Panorama-Frontscheibe und der seitlichen Festverglasung über den Fahrerhaustüren sorgte bei der Markteinführung für großes Aufsehen. Ein solch lichtdurchflutetes Interieur gab es damals im Lkw-Bereich noch nicht. Mittlerweile sind die Anforderungen an mehr Stauraum und verringerten Wärmeeintrag in die Kabine gestiegen und die großen Fensterflächen stehen diesen Anforderungen entgegen, Bild 2.

Durch den Verzicht auf die große Frontscheibe und die neue geometrische Auslegung des Dachs konnte ein Stauraumvolumen in der neuen Gepäckablage über der Frontscheibe von rund 403 Litern realisiert werden und stellt somit den besten Wert im Wettbewerbsumfeld dar. Der c_w -Wert konnte im Vergleich zum Vorgängermodell weiter reduziert werden.

Folgende Anforderungen gab es an die Hochdachentwicklung:

- Erfüllung Crashrichtlinie ECE R29-3, einhergehend mit dem Fahrerhausrohbau
- Kostenoptimierung
- Maximales Stauraumvolumen → BID (best in dimension)
- Maximale Stehhöhe
- Verbesserte Energieeffizienz (Verringerung der Fensterflächen)
- Verbesserung des c_w -Wertes

- Optimierung Gewicht (-10% im Vergleich zum Vorgänger)
- Optimierung des Wassermanagements
- direkte Anbindung der oberen Liege am Dach

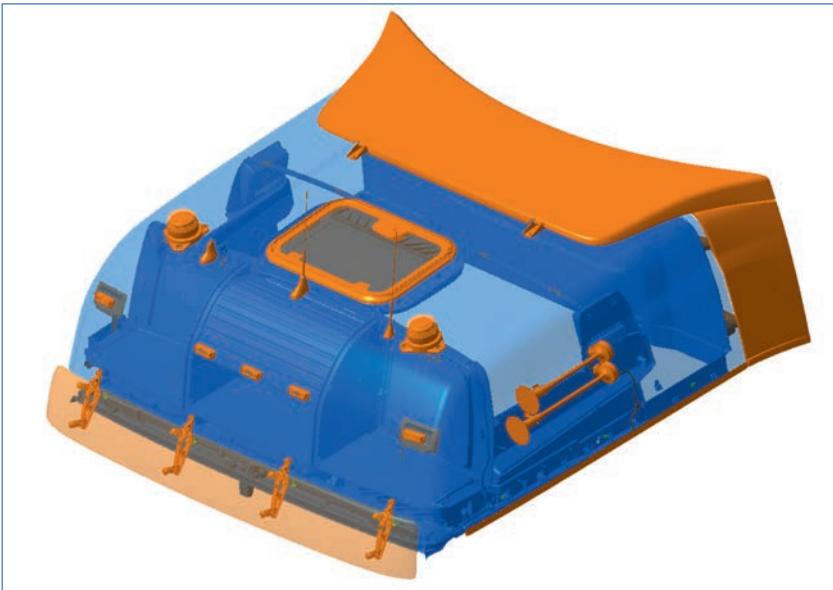


Bild 2: Hochdach XXL mit allen An- und Einbauten

2. Crashrichtlinie ECE R29-3

Seit dem 31.01.2021 gilt für alle Neuzulassungen von Nutzfahrzeugen die neue ECE R29-3 Crashrichtlinie. Diese verschärft sich gegenüber der vorhergehenden Crashrichtlinie ECE R29-2 erheblich. Speziell der Dachlasttest C wird nun zweistufig ausgeführt, einmal dynamisch (C1) und einmal statisch (C2), im Gegensatz zu einer rein statischen Belastung in der ECE R29-2, Bild 3. Somit wird das Fahrerhaus zunächst mit einer dynamischen Last durch ein Pendel von 17,6kJ beaufschlagt und dann das vorgeschädigte Fahrerhaus mit einer statischen Last von 9,8kN belastet. Nach dem Test wird der Dummy auf den Fahrersitz gesetzt (im Unterschied zum Pkw, wo sich der Dummy während des Crashes im Fahrzeug befindet). In dieser Sitzposition darf er dann kein Bauteil berühren. Auch dürfen sich keine größeren Bauteile in der Kabine lösen, die die Insassen verletzen könnten. Diese neue Testdefinition bildet die Realität besser ab, da es ein Umkippen, bzw. einen Überschlag des Lkw's simuliert.

Der Frontschlag Test A wurde um 11kJ auf 55kJ erhöht, der abzubauende Energieeintrag wurde also um 25% größer. Der neue Test B, der einen Tonnenschlag von 29,4kJ auf die A-Säulen beschreibt, löst den alten Rückwandtest ab, bei dem eine statische Last von 70kN auf die Fahrerhausrückwand aufgebracht wurde, Bild 3.

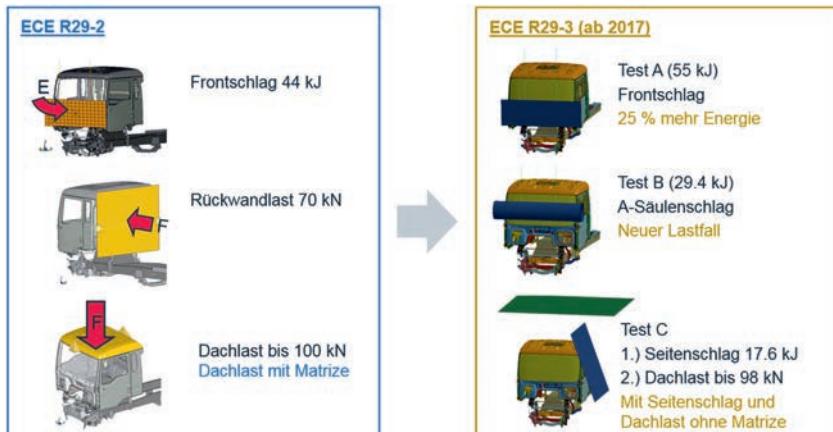


Bild 3: Änderungen von Crashrichtlinie ECE R29-2 auf ECE R29-3

3. Fakten zum Hochdach

Das neue Hochdach hat eine Abmessung von 2326 x 2016 x 770 mm, dies entspricht einer Laminat-Oberfläche von insgesamt 17,25m². Das Rohteilgewicht beträgt 81,4kg. Somit spielt der Faserverbundaufbau sein Leichtbau-Potenzial gegenüber einem Blechhochdach mit einem Mindergewicht von 30 bis 35 Prozent voll aus, Bild 4.

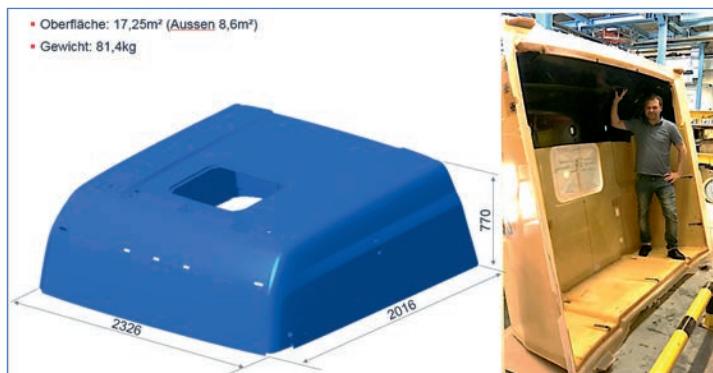


Bild 4: Größendarstellung Hochdach GX

4. Aufbau/ Verfahren Epoxid-Sandwich-RTM

Der Aufbau des Hochdaches in Epoxid-Sandwichtechnologie wird in Bild 5 anhand eines Schnittes beschrieben. Grundsätzlich wird eine Mindest-Gesamtwandstärke von 20mm angestrebt, die aber partiell auch unter-, bzw. auch überschritten wird. In bestimmten Bereichen werden das innere und das äußere Deckschichtlaminat, welche jeweils ca. 1,5mm dick sind, zusammengeführt und bilden dann eine monolithische Schicht mit ca. 3mm Wanddicke. In diesen Bereichen können dann Bauteile, wie Antennen, die Dachluke oder Aeropaketbauteile befestigt werden.

Die formgeschäumten PUR-Schaumrohlinge mit einem Raumgewicht von 120kg/m³, Bild 6, werden mit Glasfasermatten mit einem Flächengewicht von 650g/m² einfach belegt. Je nach Lastfall, werden partiell noch zusätzliche Glasfaserlagen eingebracht. Dann werden die belegten Schaumkerne in die Matrizeseite des Werkzeugs eingebracht. Nach Schließen des Werkzeugs erfolgt das Injizieren des Epoxidharzes. Nach einer circa 20 minütigen Aushärtezeit kann das Bauteil entnommen und der Weiterbearbeitung zugeführt werden. Bild 7 beschreibt den Herstellungsprozess.

Um Verbindungen darzustellen, die eine direkte Befestigung am Hochdach benötigen, werden Blecheinleger verwendet, die im Schaumkern eingeschäumt werden. Außerdem wird auch die Möglichkeit genutzt, glasfaserverstärkte Epoxidharzblöcke in die Schaumkerne einzubringen. Diese Blöcke gehen eine hervorragende Verbindung zu den beiden Deckschichtlaminaten ein, sodass beide Deckschichtlamine bei Belastung im Krafteinsetz sind. Mit diesen werden dann hochbelastete Bauteile wie die obere Schlafliege oder Aeropaketeile am Dach angebunden.

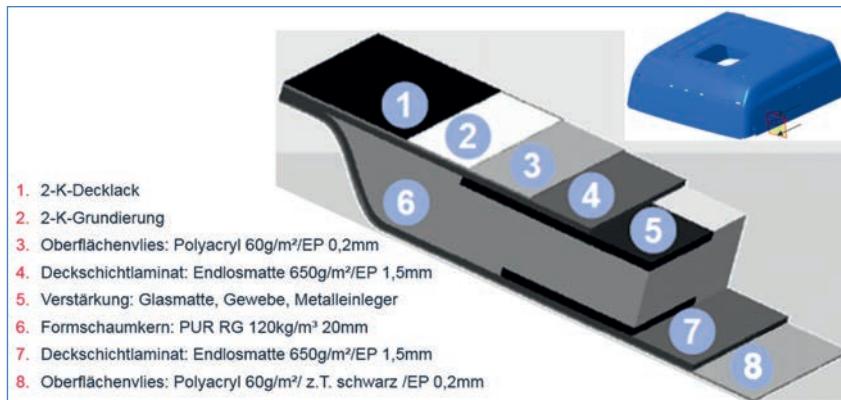


Bild 5: Aufbau der Schichten

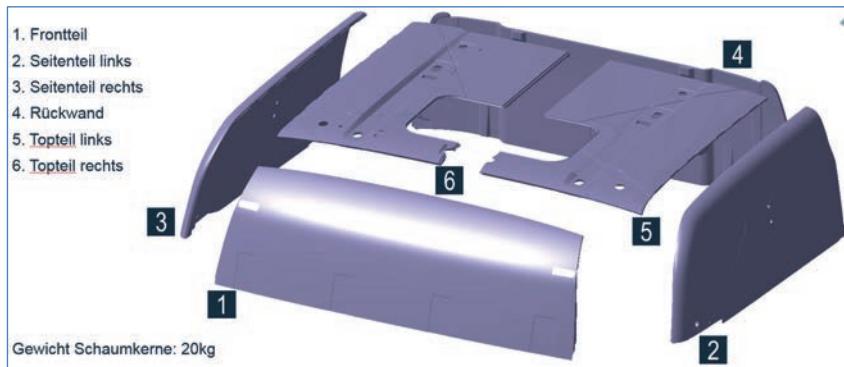


Bild 6: Schaumkeraufteilung

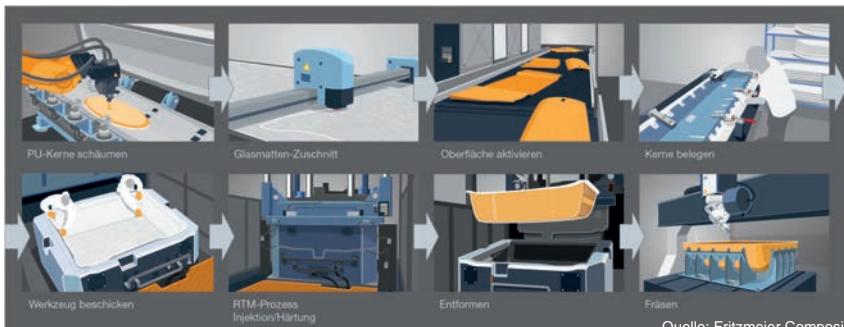


Bild 7: Fertigungsprozess des Hochdaches im RTM-Verfahren

5. RTM-Werkzeug

Die Besonderheit beim RTM-Werkzeug besteht im Aufbau der Oberflächenschicht. Diese mindestens 20mm starke Schicht besteht aus 99,9% Nickel und wird durch chemische Kondensation aus $(Ni(CO)_4$) in einem Vakuumofen auf ein ölbefeueretes so genanntes Mandrel abgeschieden und bildet eine sehr widerstandsfähige Schicht. Durch den Spantenunterbau aus Stahl erhält man dann ein für diese Größe relativ leichtes Werkzeug mit 22,4t.

Die hohe Standzeit des Werkzeuges von mehr als 200.000 Stück ist ein wesentlicher Vorteil dieses Aufbaus. Auch die hohe Maßgenauigkeit und Maßhaltigkeit über die Temperaturänderungen und die Werkzeuglaufzeit hinaus spricht für dieses Verfahren. Der gute Wärmeübergangskoeffizient ist ein weiterer Vorteil für die effiziente Temperierung des Werkzeugs.

6. Abgleich zwischen Simulation und Realversuchen

Um eine genaue Simulation, die mit dem Realcrash vergleichbar ist, durchführen zu können bedarf es einer genauen Bestandsaufnahme der Leistbarkeit der verwendeten Materialien. Hierzu wurde das bereits in Serie befindliche mittelhohe Hochdach GM als Referenz verwendet und genauestens untersucht. Dabei wurden exemplarisch Probenstücke entnommen und folgende quasistatische Versuchsserien durchgeführt:

- Zugversuch
- Zug-/Druckversuch
- Schubversuch
- 4-Punktbiegeversuch ohne Unterlegblech
- 4-Punktbiegeversuch mit Unterlegblech
- Vorabtests C2

Auf dieser Basis konnten dann Materialkarten erstellt werden, die die Basis für die ersten Simulationen darstellten. Die einzelnen Versuche, siehe beispielhaft den 4-Punktbiegeversuch in Bild 8 oder den Schubversuch in Bild 9, wurden dann in der FEM- Berechnung nachgestellt und Abweichungen korrigiert.

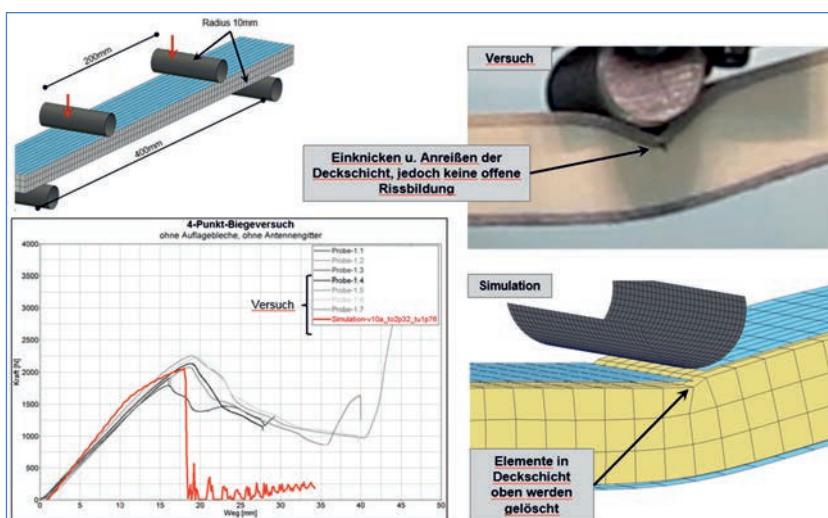


Bild 8: Sandwich-Verbund: Validierung Schub- und 4-Punktbiegeversuch ohne Blech

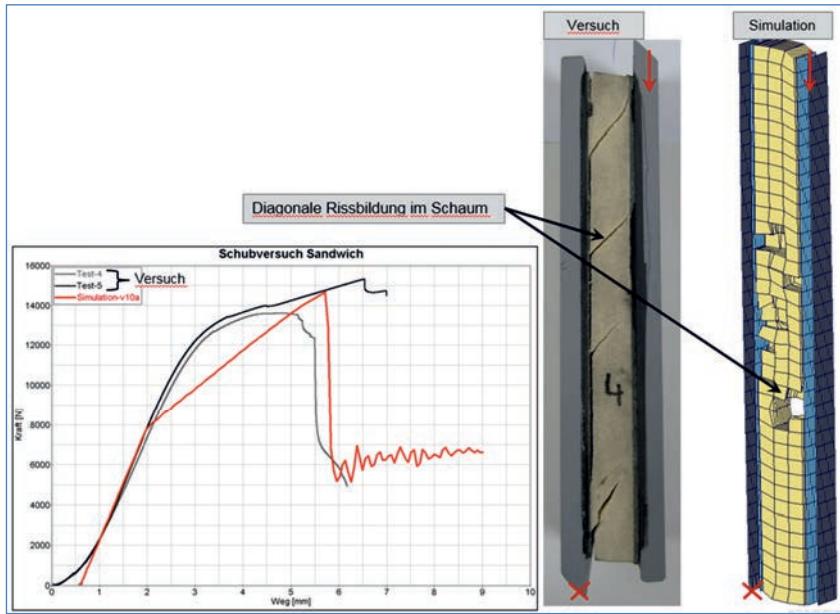


Bild 9: Sandwich-Verbund: Validierung Schubversuch

Die Simulation wurde mit allen Details aufgebaut, Bild 10. So wurden die Außen- und Innenschalen das so genannte Laminat, der Schaumkern und alle Glasfaserdoppelungen, Metalleinleger, Durchbrüche und Löcher nachgestellt.

Die Rechnungen werden mit LS-Dyna durchgeführt. Für einen Durchlauf des kompletten C1/C2 Testprogramms benötigt man mit acht CPU's acht Tage und bei priorisierten Rechnungen und vorhandener Kapazität mit 16 CPU's vier Tage. Somit sind Variantenrechnungen mit dem dazugehörigen Vorlauf der Vernetzung wesentlich schneller darzustellen als vergleichbare Realcrashes.

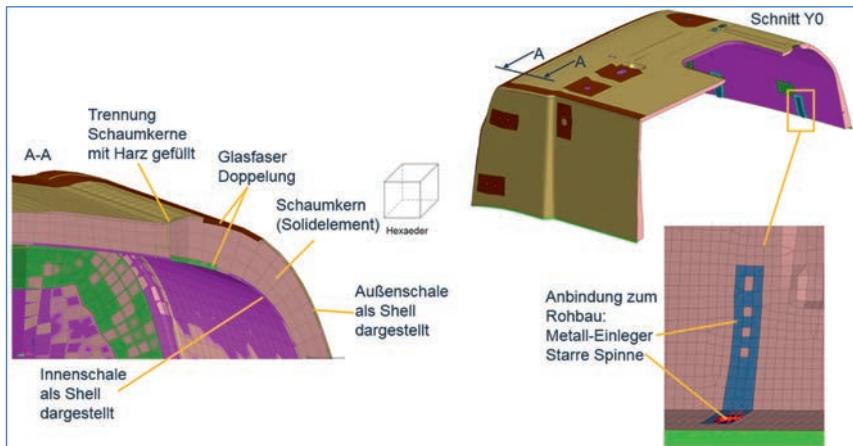


Bild 10: Aufbau der Modelle zur Simulation

Im nächsten Schritt wurde ein Fahrerhaus mit GM-Dach starr am Boden verankert und schrittweise eine Belastung bis zum Versagen der Struktur aufgebracht. Dies sollte den Test C2 ohne der Vorschädigung aus Test C1 simulieren, da Test C1 nicht ohne weiteres kurzfristig darstellbar und wiederholbar ist. Nach ca. 133kN zeigt sich ein Versagen des Daches an der C-Säule indem es vertikal aufreißt. Hier spielt das Wegknicken des Rohbaus im Bereich des Schachts für die Rohluftansaugung eine entscheidende Rolle, da hier das Dach nicht mehr gestützt wird, Bild 11.



Bild 11: Erster Komponententest mit festverankerter Karosserie

Ein Nachteil dieses vereinfachten Tests ist, dass die Last komplett über die C-Säule in die Struktur eingeleitet wird und somit diese Last im Bereich der C-Säule sehr viel höher ist als die reale Belastung des Versuchs C2.

Dieser Nachteil konnte auch schon zu diesem Zeitpunkt in der Simulation aufgezeigt und die Schäden relativ gut im Vergleich visualisiert werden.

Deshalb wurde ein Komponententest entwickelt, der nur einen Teilabschnitt des Kabinenrohbaus beinhaltet. Dabei ist die Dachoberfläche horizontal und somit parallel zur Platte, die die aufgebrachte Prüfkraft gleichmäßig über die Dachoberfläche verteilt. Somit verhält sich der Komponentenversuch ähnlich wie der Realversuch. Beim Realversuch wird die Kabine bei Beaufschlagung der Kraft erst in die hintere Lagerung gedrückt und damit die Last nahezu gleichmäßig in die Struktur eingeleitet. Der Einfluss der Frontscheibe wurde mit einer eingeklebten Aluminiumplatine simuliert, Bild 12.



Bild 12: Vereinfachter Komponententest mit zur Prüfkraft ausgerichtetem Dach

Direkte Anschraubpunkte im Hochdach wurden simuliert und im Versuch bestätigt. Hierbei wurden glasfaserverstärkte Epoxidharzblöcke in den Schaumkern eingelegt und im RTM-Prozess eingebettet. Diese Kerne gehen eine sehr gute Verbindung zwischen dem Außen- und Innenlaminat ein, haben eine sehr hohe Ausreißkraft und zeigen deutlich weniger Abzeichnungen an der Oberfläche als die bis dato eingesetzten Blecheinleger. Dabei konnten bei 10.000 Zyklen schwelender Belastung keine Beschädigungen festgestellt und eine Ausreißkraft von ca. 10kN nachgewiesen werden. Diese ist weitaus höher als die geforderte Ausreißkraft. Bild 13 zeigt die Prüfung der Anbindung der oberen Liege einmal im kompletten Dach und einmal an Ausschnitten. Hiermit konnten verschiedene Ausführungsformen mit und ohne Voralterung getestet werden.

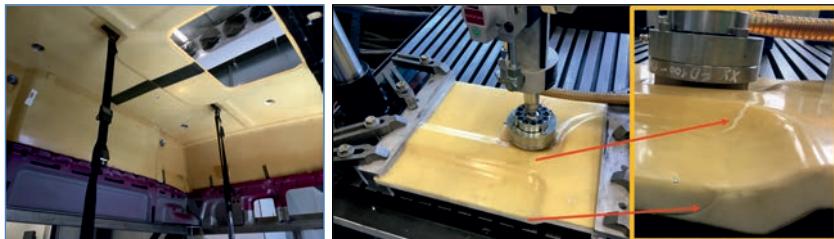


Bild 13: Erprobung Liegenanbindung im Fahrerhaus, und an Ausschnitten (neu und gealtert)

Der in Bild 14 aufgebaute Test wurde unter anderem zur Abprüfung der auftretenden Last bei einer Bahnrückwärtsverladung genutzt. Hier können bei einer Zugbegegnung im Tunnel sehr hohe Kräfte am Aeropaket auftreten, welche einer Windgeschwindigkeit von 250km/h entsprechen – Formel 1-Tempo sozusagen. Auch hier wurde nach schadensfreiem Prüfzyklus eine Last bis zum Versagen aufgebracht, die weitaus höher als gefordert war.



Bild 14: Erprobung Anbindung Aeropaket (neu und gealtert); Bahnrückwärtsverladung

Aus verschiedenen Simulationsschleifen und Versuchsreihen konnten schließlich die Realversuche in der Simulation sehr gut vorhergesagt werden. Neben den Komponententests, in denen wir den Abgleich mit und ohne Zusatzverstärkungen nachstellen konnten wurden diese Erkenntnisse dann auch über scharfe Realcrashes bestätigt. Der Abnahmecrash konnte dann den Behörden vorab 1:1 in der Simulation vorhergesagt werden. Bild 15 zeigt einen B-Muster Vorcrash nach C1 aus dem Juli 2017.

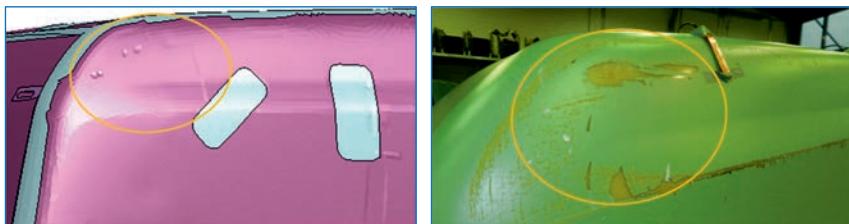


Bild 15: Vergleich Simulation zu B- Muster – Realcrash Juli 2017 nach C1

Bild 16 zeigt einen B-Muster Vorcrash nach C2 aus dem Oktober 2017 im Vergleich mit der Simulation. Hier ist gut zu erkennen, dass die Rissbildung an der hinteren linken Dachkante gut vorhergesagt werden konnte. Ebenfalls aus diesem Vorcrash stammt Bild 17 in dem man das Einknicknen des Daches im Bereich der Absenkung des Rohbaus sehr gut im Vergleich sehen kann.

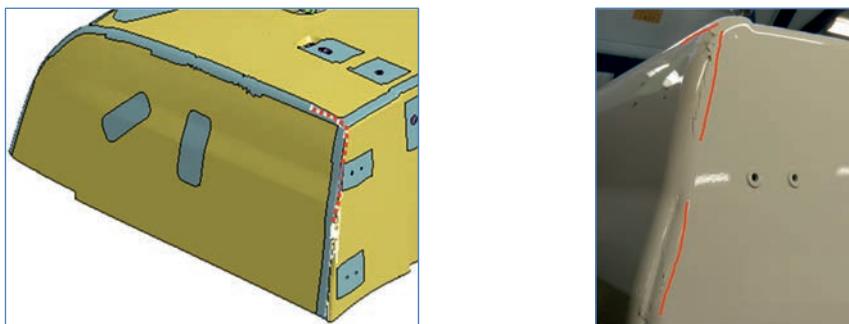


Bild 16: Vergleich Simulation zu B- Muster – Realcrash Oktober 2017 nach C2

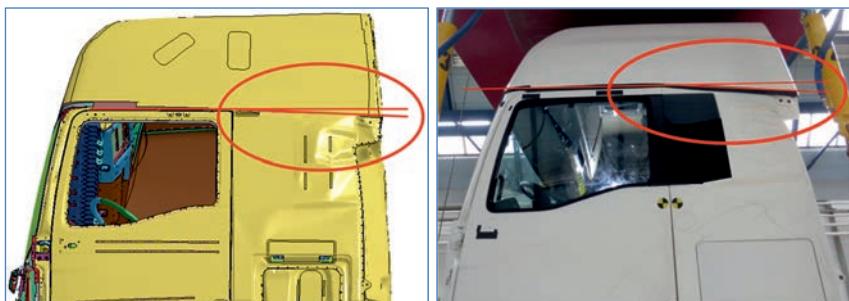


Bild 17: Vergleich Simulation zu B- Muster – Realcrash Oktober 2017 nach C2

7. Fazit

Durch umfangreiche und zum Teil unkonventionelle Testreihen ist es MAN gelungen den Abgleich zwischen Simulation und Realcrash auf ein Qualitätslevel zu heben, in dem wir in der Lage sind die Simulation für Änderungen in der Geometrie, Lagenaufbau oder Einbringen von Beschnitten zur Bestätigung der Entwicklungsziele zu nutzen.

Das Ziel, auch die Homologationsbehörden davon zu überzeugen, Änderungen per Simulation in die Serie einfließen zu lassen, ohne umfangreiche und teure Realcrashkampagnen durchführen zu müssen, ist je nach Komplexität der Änderung bereits gelungen.

Development and validation of a simulation methodology for the prediction of surface defects for plastic components with metallic effect pigments

Dr.-Ing. Daniel Kugele, Audi AG, Ingolstadt;

Dr.-Ing. Sebastian Mönnich, PEG GmbH, Darmstadt;

Cigdem Belgeli M.Sc., Technische Universität Darmstadt

Abstract

Through the use of metallic effect pigments, thermoplastic components with a metallic glossy surface can be produced by the injection-molding process. The use of such materials in the vehicle offers - by eliminating the need for painting - a great cost-saving potential. Due to the orientation of the metallic effect pigments which establishes itself during the production process, optical defects can arise on the component surface when pigment orientation is inhomogeneous. The challenge of component development and tool design is therefore to ensure a manufacturable component design even in the early phase of the vehicle development process. Together with PEG GmbH, AUDI AG is developing a method for predicting optical defects. In the context of this paper, the fundamental set of problems will be presented with reference to experimental investigations and an explanation given of the procedure for the simulative analysis of optical defects. This newly developed methodology is validated on the basis of different component geometries. The currently achievable prognostic quality and possible development potentials are discussed.

1. Initial situation and problem presentation

In automotive engineering, various surface-finishing processes (electroplating, painting, etc.) are used to create a metallic look for plastic components. As a rule, these processes are cost-intensive and render subsequent recycling more difficult.

The use of thermoplastic components with metallic effect pigments therefore offers clear advantages from the point of view both of cost-effectiveness and of sustainability. In so-called mold-in-color technology, the effect pigments are added to the molding compound, thereby making it possible to produce components with a metallic glossy surface by injection molding. At AUDI AG, for example, this technology is used for components in the bumper (see Fig. 1).



Fig. 1: Audi A4 allroad

The challenge in using this technology is to prevent optical defects arising on the component surface. The cause of such defects is to be found in the orientation of the metallic effect pigments, which already establishes itself in the manufacturing process. Fig. 2 shows in schematic form pigment orientation at the surface for an area with no defects and for an area with a flow line. An inhomogeneous pigment orientation here gives rise to a different light reflection. Areas with flow lines and weld lines are usually visible as dark areas on the component. Pigment orientation and thus the defect can only be influenced to a limited extent by process parameters. Consequently, it is all the more important to achieve an optimum result for the component design and the tool concept in the early phase of the vehicle development process. However, in the present state of technology there is no simulative methodology that can predict pigment orientation and thus defects.

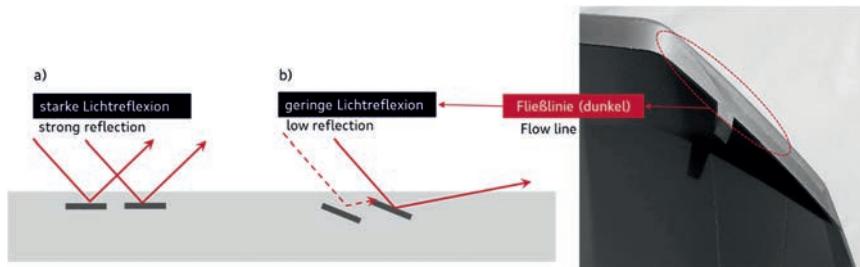


Fig. 2: Schematic representation of the pigment orientation (a) of an area without a defect and (b) an area with a flow line

2. Methodology

In a cooperation project between AUDI AG, PEG GmbH and TU Darmstadt, a method is being developed to enable prediction of the defects explained in the previous section. The injection-molding process is here calculated with Autodesk Moldflow Insight software.

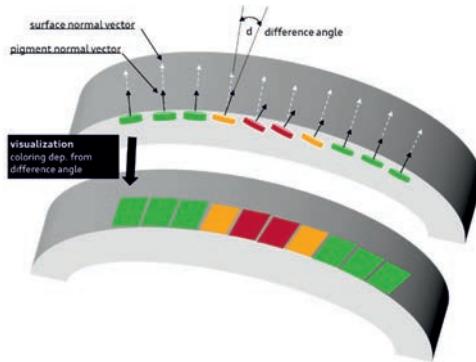


Fig. 3: Concept of difference angles

The basic idea behind defect calculation is shown in Figs. Fig. 2 and Fig. 3. If the effect pigments lie with their surface parallel to the component surface, an undisturbed light reflection can be assumed. However, if the effect pigments now lie at an as yet unknown angle to the surface, a disturbed light reflection and thus an optical defect can be assumed. Implementation in the program provides for calculating a difference angle between the surfaces of the effect pigments (flake normals) and the component surface (element

normals) and thus evaluating the possible optical defects via a difference angle. The basic sequence is shown in Fig. 4. It is divided into three steps:

1. Generating the CAD geometry to be examined
 2. Structuring and implementing the injection-molding simulation with orientation calculation and adapted aspect ratio
 3. External defect calculation and re-importation into Moldflow for graphic evaluation

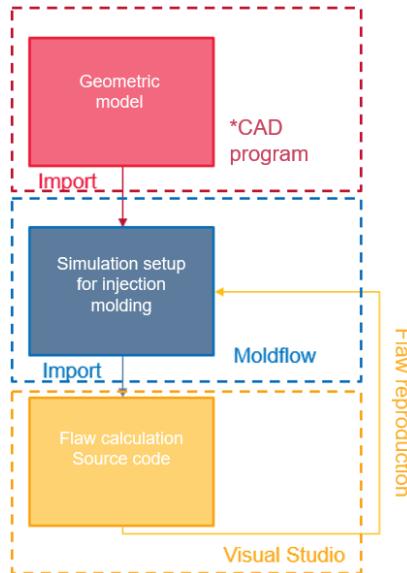


Fig. 4: Basic calculation sequence [4]

The part of the orientation calculation in Moldflow and external defect calculation will now be described in detail.

The first approach is to use the fiber orientation models included in Autodesk Moldflow Insight and in a downstream post-processing step to evaluate the results thus calculated. All of the fiber orientation models included in Autodesk Moldflow have free parameters that can be used to adjust the calculation results to, for example, experimental results.

The fiber orientation models available show the further scientific development in this field: Starting with the Folgar-Tucker model (FT) [1] and the introduction of second-order tensors to describe orientation distributions [2], two model parameters are available to the user in Moldflow. These are on the one hand the so-called aspect ratio $\frac{L}{D}$, which will be described in more detail later on, and the so-called interaction coefficient C_i , which describes the interaction of filler particles with each other.

With the so-called RSC model (reduced strain closure model) [3], which has been supplemented by another parameter κ to take into account the slower orientation kinetics in the edge region, a total of three parameters are available.

Instead of the coefficient κ the current standard model, the Moldflow Rotational Diffusion Model (MRD), offers three new coefficients D_{1-3} .

For all models, the model coefficients can be used to influence the orientation distribution that is set via the component wall thickness. The so-called aspect ratio, on the other hand, describes the geometry of the particles contained in the polymer. As shown in Fig. 5, L describes the length of an ellipsoid and D describes its diameter. The usual purpose for which the orientation models are used provides for an aspect ratio between 10 and 40. In its shape the ellipsoid thus approaches, for example, a short glass fiber. However, if an aspect ratio significantly smaller than 1 is now selected the original long axis becomes very short compared to the diameter. The ellipsoid flattens and its shape approaches that of a platelet. On the basis of the manufacturer data for the effect pigments used at AUDI AG, an aspect ratio of on average 0.001 was calculated and used for all simulations carried out.

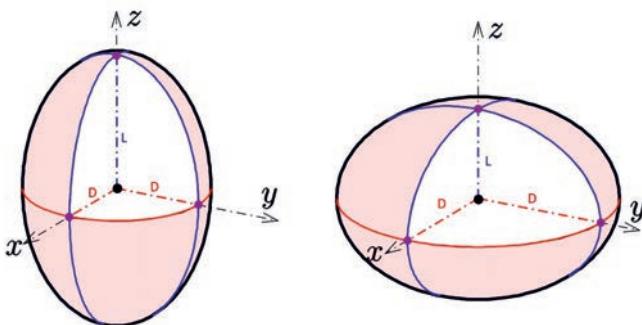


Fig. 5: Aspect ratio [4]

Parameter studies also carried out on a simple plate geometry have shown that the best results can be achieved with the RSC model.

The result of the Moldflow simulation is, as already mentioned, a second-order orientation tensor, which describes the orientation distribution of the flakes in the component. How the difference angle between flakes and surface normals is to be determined from the second-order orientation tensor is described in the following section.

The current degree of progress only covers a consideration of the topmost element layer of the injection-molding simulation model. To what extent deeper flakes contribute to the formation of defects is unclear and is currently still being investigated. In order to now be able to calculate a difference angle according to the planned methodology, two vectors must be available. Firstly, those elements of the injection-molding mesh which have three nodes at the component surface are identified and are thus classed as surface elements. For the side of the elements that lies between the three nodes identified, the normal vector is calculated. As a result of this first step, all element numbers of the surface elements and the associated normal vectors are now available.

The second-order orientation tensors calculated from the Moldflow simulations are also available for the identified surface elements. Since the orientation tensor is present in relation to the component coordinate system, it cannot be used until after a transformation into the main axis system. The properties of second-order orientation tensors are described in detail in [2]. In summary it can be deduced that the eigenvalues of the tensor describe the 'degree' of orientation and the associated eigenvectors describe the corresponding direction. First results, which only represent the calculated difference angle between the surface normal and the eigenvector (see Fig. 6), show very small differences between the two. Multiplying the difference angle by the associated eigenvalue significantly improves the quality of the representation.

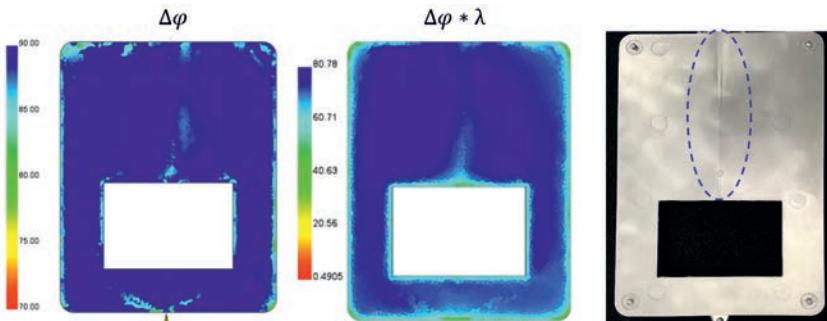


Fig. 6: Difference angle and scaling of the difference angle via the eigenvalue [4]

3. Experimental investigation

The aim of the experimental investigation is to validate the methodology with the aid of a complex component geometry and under the boundary conditions of a series process. For this purpose, the component shown in Fig. 7 is selected. The component with dimensions 400mm x 375mm contained different construction elements such as wall thickness jumps, ribs, snap hooks, openings, welding domes. These influence the filling process and thus represent a challenge for the use of MIS material. Injection takes place centrally on the upper side of the component. Here, in addition to the PP material Hifax TYC 459P S72944, the PMMA/ASA material AC-MA 50001 F EFC3563-E2) is used to carry out the tests.

Preliminary tests have shown that the surface defects depend significantly on the injection speed. Higher injection speeds improve the component quality (fewer flow lines).

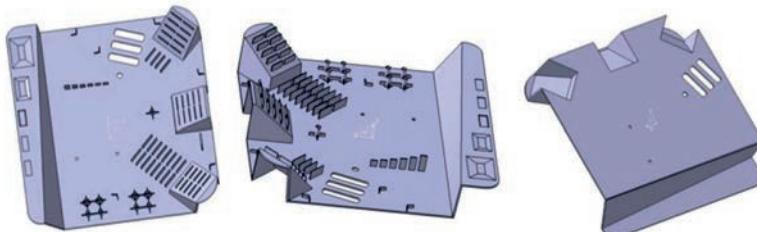


Fig. 7: CAD model of the component from different perspectives [5]

For this reason, the injection time is varied in several steps when performing the test. The detailed test parameters can be found in Table 1.

Table 1: Test parameters

	PP	PMMA/ASA
Basic wall thickness	3 mm	3 mm
Tool temperature	55 °C	80 °C
Melt temperature	250 °C	260 °C
Injection time T_e	0.8 s; 1 s; 2 s; 3 s	2 s; 3 s; 4 s
Holding pressure	400 bar (profile)	400 bar (profile)
Number of components	10 components per T_e	10 components per T_e

4. Conclusion and discussion of the results

The results of the simulation and the experimental investigation are compared and discussed below. An overview of the entire component is shown in Fig. 8. For a more precise evaluation of the defects, three characteristic sections of the component are examined in detail. In the component section according to Fig. 9(a), three rectangular areas can be seen in which the wall thickness has been locally reduced. Optical imperfections (dark flow lines) are clearly visible in the components in these areas. When the simulation result is compared, a clear color variation can also be seen here. The presence of a defect can thus be predicted well, and the area of the defect can also be predicted with a good prognostic quality. The length and the exact course of the flow line cannot be evaluated in the simulation.

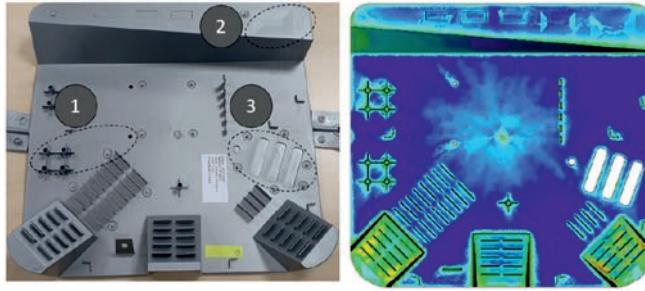


Fig. 8: Comparison between experiment and simulation (overview of entire component) [4]

Fig. 9(b) and (c) show the results of the component areas with welding domes and openings. The defects can be localized even in these areas in the simulation with an acceptable degree of blurring. After a breakthrough, a fine, dark weld line always appears on the components (experiment), the course of which mostly extends to the edge of the component (end of the flow path). In the simulation, a clear color variation is observed after a breakthrough. The existence of a defect can thus be correctly predicted. Even the direction of the flow line can usually be seen. On the other hand, the extent of the defect in terms of the shape, thickness and length of the flow line cannot always be clearly determined. In the area of welding domes, the existence of defects is correctly predicted by considering the orientation distribution. However, the exact position and the course of the defects cannot be shown here either. The simulation tends to predict slightly more defects than can actually be found on the real component.

Overall, the methodology shows great potential with regard to failure prediction, which can be further optimized. A promising approach could be to calculate and visualize the gradient of the difference angle. The basis for this consideration is the fact that with a slow and continuous change in the difference angle, the color change will not be perceived as a defect. An abrupt change, on the other hand, is clearly perceived and should be able to be represented in particular by the gradient.

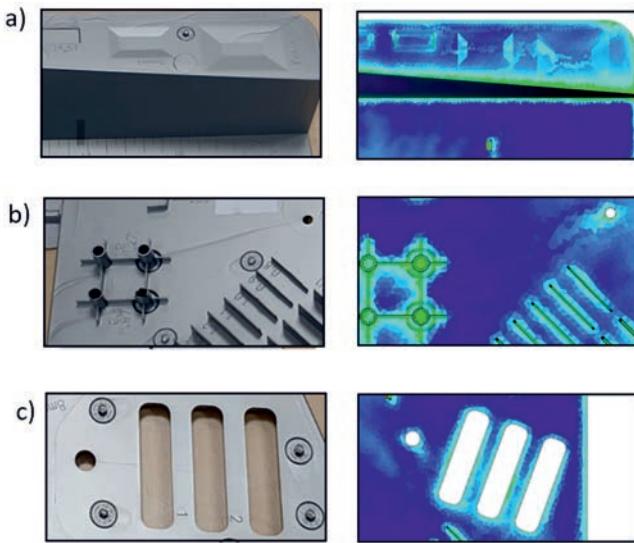


Fig. 9: Comparison between experiment and simulation in three detailed views:
(a) flow lines at jumps in wall thickness; (b) flow lines after welding domes; (c) weld line after breakthroughs [4]

References

1. **Folgar, F. and Tucker, C.** Orientation behavior of fibers in concentrated suspensions. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 3. 1984, pp. 98-119.
2. **Advani, S. and Tucker, C.** The use of tensors to describe and predict fiber orientation in short fiber composites. *Journal of Rheology* 31. 1987, pp. 751-784.
3. **Wang, J., O'Gara, J. and Tucker, C.** An objective model for slow orientation kinetics in concentrated fiber suspensions: theory and rheological evidence. *Journal of Rheology* 52. 2008, pp. 1179-1200.
4. **Belgeli, Cigdem.** *Weiterentwicklung und Validierung einer neuen Methode zur Vorhersage von optischen Fehlstellen in thermoplastischen Bauteilen mit Effektpigmenten* [Further development and validation of a new method for predicting optical defects in thermoplastic components with effect pigments]. Darmstadt: TU Darmstadt, Institute for Statics and Design, 2020.
5. **Butcher, Jonas.** *Internship documentation: design of a test component*. s.l. : Hochschule Augsburg, 2020.
6. **Phelps, J. and Tucker, C.** An anisotropic rotary diffusion model for fiber orientation in short- and long-fiber thermoplastics. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 156. 2008, pp. 165-176.
7. **Cintra, J. and Tucker, C.** Orthotropic closure approximations for flow-induced fiber orientation. *Journal of Rheology* 39. 1995, pp. 1095-1122.
8. **Advani, S. and Tucker, C.** Closure approximations for three-dimensional structure tensors. *Journal of Rheology* 34. 1990, pp. 367-387.

Entwicklung und Validierung einer Simulationsmethodik zur Vorhersage von Oberflächendefekten für Kunststoffbauteile mit metallischen Effektpigmenten

Dr.-Ing. Daniel Kugele, Audi AG, Ingolstadt;

Dr.-Ing. Sebastian Mönnich, PEG GmbH, Darmstadt;

M. Sc. Cigdem Belgeli, Technische Universität Darmstadt

Kurzfassung

Durch den Einsatz von metallischen Effektpigmenten können thermoplastische Bauteile mit einer metallisch glänzenden Oberfläche im Spritzgießverfahren hergestellt werden. Die Verwendung solcher Materialien im Fahrzeug bietet - durch den Entfall der Lackierung - ein großes Kostenpotential. Durch die sich einstellende Orientierung der metallischen Effektpigmente während des Herstellprozesses können, bei inhomogener Pigmentorientierung, optische Fehlstellen auf der Bauteiloberfläche entstehen. Die Herausforderung der Bauteilentwicklung und Werkzeugauslegung ist folglich die Sicherstellung eines fertigungsgerechten Bauteildesigns bereits in der frühen Phase des Fahrzeugentwicklungsprozesses. Die AUDI AG entwickelt gemeinsam mit der PEG GmbH eine Methodik zur Vorhersage optischer Fehlstellen. Im Rahmen des Vortrags wird die grundsätzliche Problematik anhand von experimentellen Untersuchungen dargestellt und die Vorgehensweise zur simulativen Analyse optischer Fehlstellen erläutert. Die neu entwickelte Methodik wird anhand von unterschiedlichen Bauteilgeometrien validiert. Dabei werden die aktuell erreichbare Prognosegüte und mögliche Entwicklungspotentiale diskutiert.

1. Ausgangssituation und Problemstellung

Zur Erzeugung einer metallischen Optik kommen bei Kunststoffbauteilen im Automobilbau unterschiedliche Oberflächenveredlungsverfahren (Galvanik, Lackierung, etc.) zum Einsatz. In der Regel sind diese Verfahren kostenintensiv und erschweren ein nachträgliches Recycling. Der Einsatz von thermoplastischen Bauteilen mit metallischen Effektpigmenten bietet daher sowohl aus Sicht der Wirtschaftlichkeit als auch der Nachhaltigkeit deutliche Vorteile. Bei der sogenannten Mold-in-Color-Technologie werden die Effektpigmente in das Granulat beigemischt, wodurch im Spritzgießverfahren Bauteile mit einer metallisch glänzenden Oberfläche hergestellt werden können. Bei der AUDI AG wird diese Technologie beispielsweise für Bauteile im Stoßfänger eingesetzt (vgl. Bild 1).



Bild 1: Audi A4 Allroad

Die Herausforderung beim Einsatz dieser Technologie ist die Vermeidung von optischen Fehlstellen auf der Bauteilloberfläche. Die Ursache solcher Fehler liegt in der Orientierung der metallischen Effektpigmente, welche sich bereits im Herstellungsprozess einstellt. Bild 2 zeigt schematisch die Pigmentorientierung an der Oberfläche für einen Bereich ohne Fehlstelle und einen Bereich mit Fließlinie. Eine inhomogene Pigmentorientierung sorgt dabei für eine unterschiedliche Lichtreflektion. Bereiche mit Fließlinien und Bindenähten werden in der Regel als dunkle Bereiche auf dem Bauteil sichtbar. Die Pigmentorientierung und damit die Fehlstelle kann nur bedingt über Prozessparameter beeinflusst werden. Folglich ist es umso wichtiger bereits in der frühen Phase des Fahrzeugentwicklungsprozesses das Bauteildesign und das Werkzeugkonzept optimal zu gestalten. Jedoch gibt es im Stand der Technik keine simulative Methodik um die Pigmentorientierung und damit die Fehlstellen vorhersagen zu können.

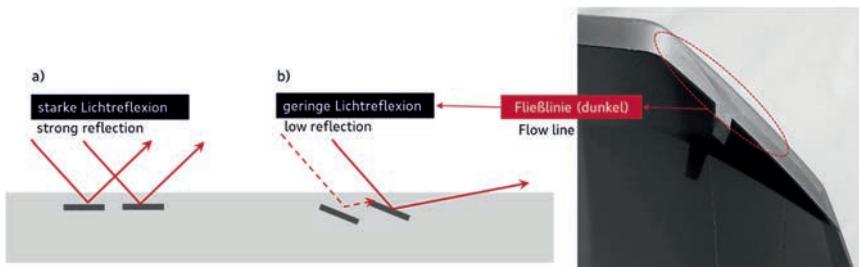


Bild 2: Schematische Darstellung der Pigmentorientierung eines Bereichs ohne Fehlstelle (a) und eines Bereichs mit Fließlinie (b)

2. Methodik

In einem Kooperationsprojekt zwischen der AUDI AG, der PEG GmbH und der TU Darmstadt wird eine Methode entwickelt, um die Vorhersage der in vorherigem Abschnitt erläuterten Fehlstellen zu ermöglichen. Dabei wird der Spritzgießprozess mit der Software Autodesk Moldflow Insight berechnet.

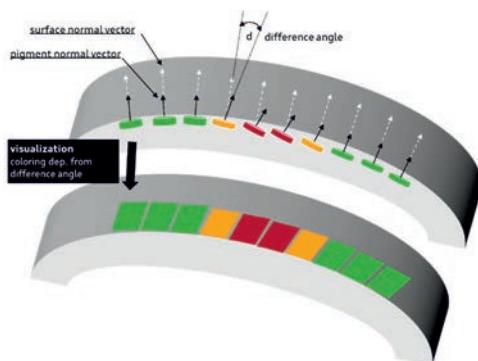


Bild 3: Idee Differenzwinkel

Die grundsätzliche Idee der Fehlstellenberechnung ist in Bild 2 und Bild 3 dargestellt. Liegen die Effektpigmente mit ihrer Oberfläche parallel zur Bauteilloberfläche, ist von einer ungestörten Lichtreflexion auszugehen. Weisen die Effektpigmente nun einen, noch unbekannten Winkel, zur Oberfläche auf, ist von einer gestörten Lichtreflexion und damit einer optischen Fehlstelle auszugehen. Die programmtechnische Umsetzung sieht vor, einen Differenzwinkel zwischen den Oberflächen der Effektpigmente (Flächennormale) und der

Bauteiloberfläche (Elementnormale) zu berechnen und so die möglichen optischen Fehlstellen über einen Differenzwinkel zu bewerten. Der prinzipielle Ablauf ist in Bild 4 dargestellt. Er gliedert sich in drei Schritte:

1. Erzeugen der zu untersuchenden CAD Geometrie
2. Aufbau und Durchführung der Spritzgießsimulation mit Orientierungsberechnung und angepasstem Aspektverhältnis
3. Externe Fehlstellenberechnung und Rückimport in Moldflow zur graphischen Auswertung

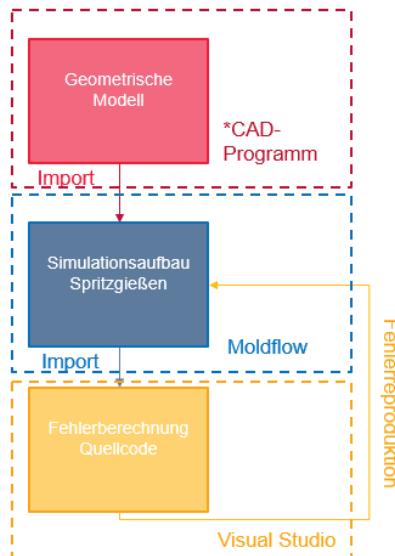


Bild 4: Prinzipieller Berechnungsablauf [4]

Im Detail werden nun der Teil der Orientierungsberechnung in Moldflow und die externe Fehlstellenberechnung Beschrieben.

Der erste Ansatz sieht vor, die in Autodesk Moldflow Insight enthaltenen Faserorientierungsmodelle zu verwenden und die so berechneten Ergebnisse in einem nachgelagerten Postprocessing auszuwerten. Alle in Autodesk Moldflow enthaltenen Faserorientierungsmodelle haben freie Parameter, die zur Anpassung der Berechnungsergebnisse an z.B. experimentelle Ergebnisse verwendet werden können.

Die zur Verfügung stehenden Faserorientierungsmodelle zeigen die wissenschaftliche Weiterentwicklung in diesem Themengebiet auf:

Beginnend mit dem Folgar-Tucker Modell (FT) [1] und der Einführung von Tensoren 2ter Stufe zur Beschreibung von Orientierungsverteilungen [2] stehen dem Anwender in Moldflow zwei Modellparameter zur Verfügung. Dies sind zum einen das sogenannte Aspektverhältnis $\frac{L}{d}$, welches im späteren noch detaillierter beschrieben wird, und der sogenannte Interaktionskoeffizient C_i , der die Interaktion von Füllstoffpartikeln untereinander beschreibt.

Mit dem sogenannten RSC Modell (reduced strain closure model) [3], das um einen weiteren Parameter κ ergänzt wurde um der langsameren Orientierungskinetik im Randbereich Rechnung zu tragen, stehen in Summe drei Parameter zur Verfügung.

Das aktuelle Standardmodell, das Moldflow Rotational Diffusion Model (MRD) bietet anstatt des Koeffizienten κ drei neue Koeffizienten D_{1-3} .

Für alle Modelle gilt, dass mit den Modellkoeffizienten die sich über der Bauteilwanddicke einstellende Orientierungsverteilung beeinflusst werden kann. Das sogenannte Aspektverhältnis hingegen beschreibt die Geometrie der im Polymer enthaltenen Partikel. Wie in Bild 5 dargestellt, beschreibt L die Länge eines Ellipsoiden und D den Durchmesser. Der übliche Verwendungszweck der Orientierungsmodelle sieht ein Aspektverhältnis zwischen 10 und 40 vor. Dadurch nähert sich das Ellipsoid in seiner Gestalt z.B. einer Kurzglasfaser an. Wenn man jetzt das Aspektverhältnis jedoch deutlich kleiner als 1 wählt, wird die ursprüngliche Lange Halbachse sehr kurz gegenüber des Durchmessers. Das Ellipsoid wird abgeflacht und nähert seine Form einem Plättchen an. Auf Basis von Herstellerdaten der bei der AUDI AG

eingesetzten Effektpigmente wurde ein Aspektverhältnis von im Durchschnitt 0,001 berechnet und für alle durchgeführten Simulationen verwendet.

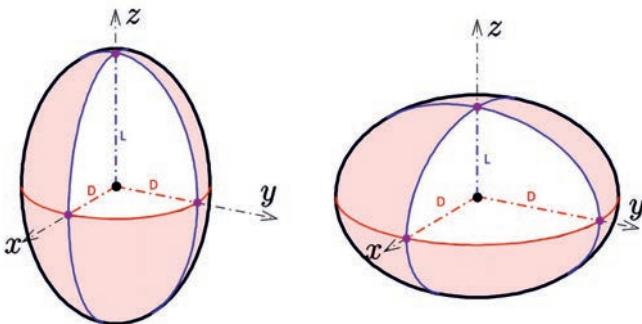


Bild 5: Aspektverhältnis [4]

Ebenfalls durchgeführte Parameterstudien an einfachen Plattengeometrie haben gezeigt, dass mit dem RSC Modell die besten Ergebnisse erzielt werden können.

Das Ergebnis der Moldflowsimulation ist wie bereits angesprochen ein Orientierungstensor 2. Stufe, der die Orientierungsverteilung der Flakes im Bauteil beschreibt. Wie aus dem Orientierungstensor 2. Stufe der Differenzwinkel zwischen Flakes und Oberflächennormale bestimmt werden soll wird im Folgenden Abschnitt beschrieben.

Der aktuelle Stand der Arbeit sieht nur eine Betrachtung der obersten Elementschicht des Modells der Spritzgussimulation vor. In wieweit tieferliegende Flakes zur Fehlstellenausbildung beitragen ist unklar und wird aktuell noch untersucht. Um nun entsprechend der geplanten Methodik einen Differenzwinkel berechnen zu können, müssen zwei Vektoren zur Verfügung stehen. Zuerst werden die Elemente des Spritzgussnetzes identifiziert, die drei Knoten an der Bauteiloberfläche haben und so als Oberflächenelemente gelten. Für die Seite der Elemente die zwischen den drei identifizierten Knoten liegt, wird der Normalenvektor berechnet. Als Ergebnis dieses ersten Schrittes liegen nun alle Elementnummern der Oberflächenelemente und die zugehörigen Normalenvektoren vor.

Für die identifizierten Oberflächenelemente liegen zusätzlich, die aus den Moldflowsimulationen berechneten Orientierungstensoren 2. Stufe vor. Da der

Orientierungstensor in Bezug auf das Bauteilkordinatensystem vorliegt, kann er erst nach einer Transformation in das Hauptachsensystem weiter verwendet werden. Die Eigenschaften von Orientierungstensoren 2. Stufe sind ausführlich in [2] beschrieben. Es kann zusammengefasst abgeleitet werden, dass die Eigenwerte des Tensors den „Grad“ der Orientierung und die zugehörigen Eigenvektoren die entsprechende Richtung beschreiben. Erste Ergebnisse, die nur den berechneten Differenzwinkel zwischen Oberflächennormale und Eigenvektor darstellt (siehe Bild 6) zeigen, sehr kleine Differenzen zwischen den beiden. Eine Multiplikation des Differenzwinkels mit dem zugehörigen Eigenwert, verbessert die Darstellungsgüte deutlich.

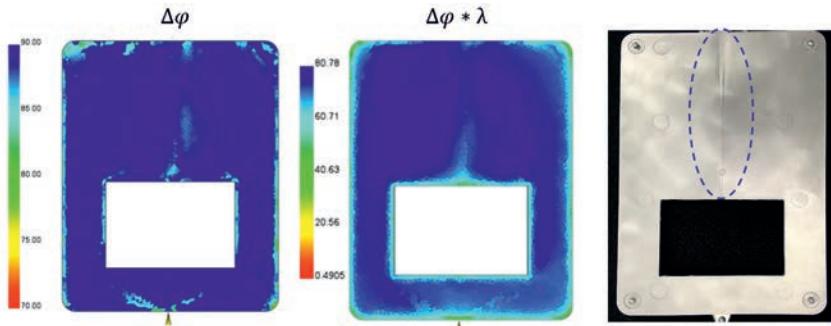


Bild 6: Differenzwinkel und Skalierung des Differenzwinkels über Eigenwert [4]

3. Experimentelle Untersuchung

Ziel der experimentellen Untersuchung ist die Validierung der Methodik anhand einer komplexen Bauteilgeometrie und unter den Randbedingungen eines Serienprozesses. Dazu wird das in Bild 7 dargestellte Bauteil ausgewählt. Das Bauteil mit einer Abmessung von 400 mm x 375 mm beinhaltet unterschiedliche Konstruktionselemente wie Wandstärkensprünge, Rippen, Schnapphaken, Durchbrüche, Schweißdome. Diese beeinflussen den Fülvorgang und stellen damit eine Herausforderung für die Verwendung von MIC-Material dar. Die Anspritzung erfolgt zentral auf der Oberseite des Bauteils, wobei neben dem PP-Material Hifax TYC 459P S72944 auch das PMMA/ASA-Material AC-MA 50001 F EFC3563-E2) zur Versuchsdurchführung eingesetzt.

In Vorversuchen hat sich gezeigt, dass die Oberflächendefekte signifikant von der Einspritzgeschwindigkeit abhängen. Höhere Einspritzgeschwindigkeiten verbessern die Bauteilqualität (weniger Fließlinien).

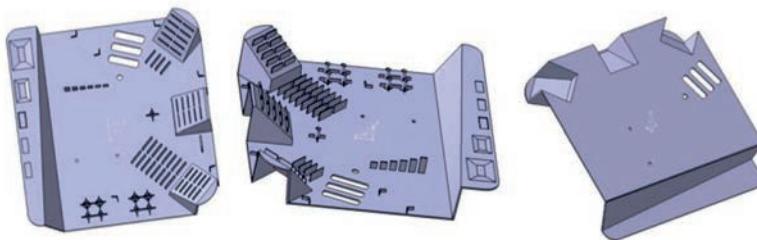


Bild 7: CAD-Modell des Bauteils aus unterschiedlichen Perspektiven [5]

Aus diesem Grund wird bei der Versuchsdurchführung die Einspritzzeit auf mehreren Stufen variiert. Die detaillierten Versuchsparameter können Tabelle 1 entnommen werden.

Tabelle 1: Versuchsparameter

	PP	PMMA/ASA
Grundwandstärke	3 mm	3 mm
Werkzeugtemperatur	55 °C	80 °C
Massetemperatur	250 °C	260 °C
Einspritzzeit T_e	0,8 s; 1 s; 2 s; 3 s	2 s; 3 s; 4 s
Nachdruck	400 bar (Profil)	400 bar (Profil)
Anzahl Bauteile	10 Bauteile je T_e	10 Bauteile je T_e

4. Fazit und Diskussion der Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Simulation und der experimentellen Untersuchung gegenübergestellt und diskutiert. Eine Übersicht des gesamten Bauteils ist in Bild 8 dargestellt. Zur genaueren Bewertung der Fehlstellen werden drei charakteristische Abschnitte des Bauteils im Detail betrachtet. Auf dem Bauteilsabschnitt gemäß Bild 8 a) sind drei rechteckige Bereiche erkennbar, in welchen die Wandstärke lokal reduziert wurde. Auf den Bauteilen sind in diesen Bereichen optische Fehlstellen (dunkle Fließlinien) deutlich erkennbar. Vergleicht man das Simulationsergebnis so ist auch hier eine deutliche Farbvariation erkennbar. Das Vorhandensein einer Fehlstelle lässt sich damit gut vorhersagen, auch der Bereich des Fehlers lässt sich mit guter Prognosegüte vorhersagen. Die Länge und der exakte Verlauf der Fließlinie kann in der Simulation nicht bewertet werden.



Bild 8: Vergleich zwischen Experiment und Simulation (Gesamtübersicht Bauteil) [4]

Bild 9 b) und c) zeigt die Ergebnisse der Bauteilbereiche mit Schweißdomen und Durchbrüchen. Die Fehlstellen lassen sich auch in diesen Bereichen in der Simulation mit einer akzeptablen Unschärfe lokalisieren. Nach einem Durchbruch zeigt sich auf den Bauteilen (Experiment) stets eine feine, dunkle Bindenaha, deren Verlauf sich zumeist bis an den Bauteilrand (Fließwegende) zieht. In der Simulation wird nach einem Durchbruch eine deutliche Farbvariation beobachtet. Die Existenz einer Fehlstelle kann somit korrekt vorhergesagt werden. Auch die Richtung der Fließlinie lässt sich in der Regel erkennen. Das Ausmaß der Fehlstelle bezüglich der Ausprägung, Dicke und Länge der Fließlinie lässt sich dagegen nicht immer eindeutig ermitteln. Im Bereich der Schweißdome wird die Existenz von Fehlstellen durch die Betrachtung der Orientierungsverteilung richtig vorhergesagt. Allerdings lässt sich die genaue Position und der Verlauf der Fehlstellen auch hier nicht

darstellen. In der Simulation werden tendenziell etwas mehr Fehlstellen vorhergesagt, als tatsächlich auf dem realen Bauteil zu finden sind.

Insgesamt zeigt die Methodik im Hinblick auf die Fehlervorhersage großes Potential, welches weiter optimiert werden kann. Ein vielversprechender Ansatz könnte es sein, den Gradienten des Differenzwinkels zu berechnen und zu visualisieren. Grundlage für diese Überlegung ist die Tatsache, dass bei einer langsamen und kontinuierlichen Änderung des Differenzwinkels die Farbänderung nicht als Fehlstelle wahrgenommen wird. Eine abrupte Änderung hingegen wird deutlich wahrgenommen und müsste sich insbesondere durch den Gradienten darstellen lassen.

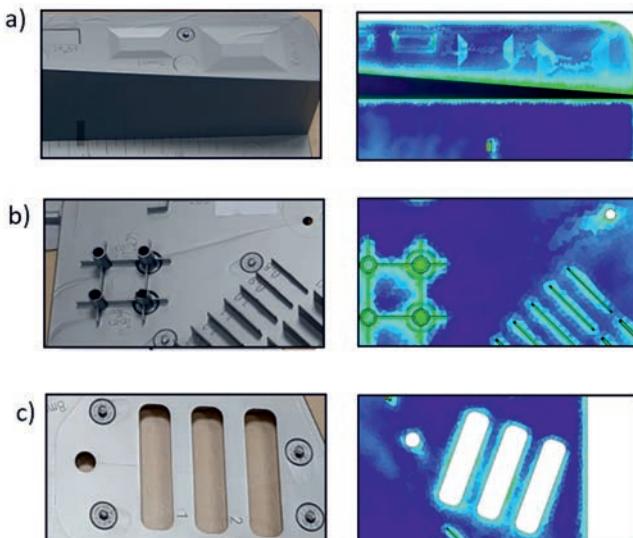


Bild 9: Vergleich zwischen Experiment und Simulation an drei Detailansichten:

- a) Fließlinien an Wandstärkensprüngen;
- b) Fließlinien nach Schweißdomen;
- c) Bindenahrt nach Durchbrüchen [4]

Literaturverzeichnis

1. **Folgar, F. und Tucker, C.** Orientation Behavior of Fibers in Concentrated Suspensions. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 3. 1984, S. 98-119.
2. **Advani, S. und Tucker, C.** The Use of Tensors to Describe and Predict Fiber Orientation in Short Fiber Composites. *Journal of Rheology* 31. 1987, S. 751-784.
3. **Wang, J., O'Gara, J. und Tucker, C.** An objective model for slow orientation kinetics in concentrated fiber suspensions: Theory and rheological evidence. *Journal of Rheology* 52. 2008, S. 1179-1200.
4. **Belgeli, Cigdem.** *Weiterentwicklung und Validierung einer neuen Methode zur Vorhersage von optischen Fehlstellen in thermoplastischen Bauteilen mit Effektpigmenten*. Darmstadt : TU Darmstadt, Institut für Statik und Konstruktion, 2020.
5. **Schlachter, Jonas.** *Praktikumsdokumentation, Konstruktion eines Versuchsbauteils*. s.l. : Hochschule Augsburg, 2020.
6. **Phelps, J. und Tucker, C.** An anisotropic rotary diffusion model for fiber orientation in short- and long-fiber thermoplastics. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 156. 2008, S. 165-176.
7. **Cintra, J. und Tucker, C.** Orthotropic closure approximations for flow-induced fiber orientation. *Journal of Rheology* 39. 1995, S. 1095-1122.
8. **Advani, S. und Tucker, C.** Closure approximations for three-dimensional structure tensors. *Journal of Rheology* 34. 1990, S. 367-387.

The History of Integrative Simulation from Laboratories to all Designers' Desktops

The democratization of performance and manufacturability design for short fiber-reinforced thermoplastic parts.

Dr.-Ing. Santhanu Jana, Frank Ehrhart, Mirko Bromberger,
ALTAIR Engineering GmbH, Böblingen

Abstract

Lightweight design is becoming a key issue to improve the energy efficiency of all industries. Design of lightweight components occasionally involves part replacement, tooling, function integration, and determining feasibility and manufacturing costs. Here, to attain the desired properties fiber-reinforced polymers can be a suitable replacement. Hence, to have an early evaluation of concept designs that involves several complex steps, Altair's Simulation-driven Design is the most promising alternative.

Introduction

The benefits of integrative simulation for fiber-reinforced thermoplastics were already proven in the early 2000s [1,2,3,4]. However, the broad application of Simulation-driven Design and Integrative Simulation technology was hindered by the complexity of the overall process and the significant investment in hardware, and software.

The current work presented here shows the combination of design for performance and design for manufacturability, accessible material modeling, and injection molding simulation. In this work, a comprehensive Simulation-driven Design workflow is presented that enables early determination of manufacturing alternatives for a typical part made of polymer reinforced with short fibers. The workflow ensures identification of requirements, topology optimization factoring in manufacturing design rules, automatic creation of geometry, part performance, and manufacturing feasibility checks. This process is iterative, and the first step involves the extraction of loads and requirements through kinematic simulation. The next step involves developing a concept design with manufacturing constraints through structural simulation and automatic geometric creation of different topologies. Manufacturing feasibility relates to evaluation of the injection molding process. Material properties are evaluated by fiber orientation analysis, simulated using a particle-based approach with one-dimensional two-

node tracker particles [5]. Next, warpage analysis and strength analysis are performed. For the fiber-reinforced part, a multiscale material model based on the actual fiber orientation results is constructed to compute the material properties at each point during the simulation. Consequently, applied there is a great potential for saving hundreds of thousands of tons of material while designing more sustainable products in faster with a reduced development risk.

Simulation-driven Design

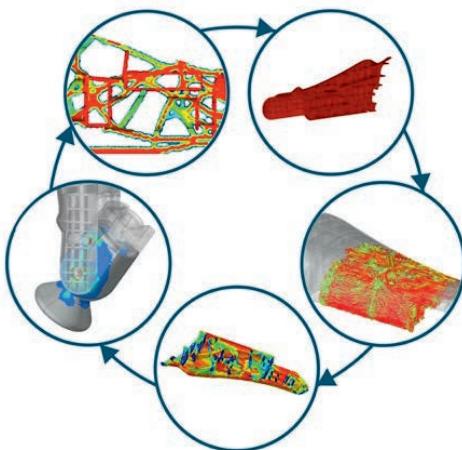


Fig.1: Altair's seamless simulation-driven design process for Injection molding plastic parts allows closed design loops from structural optimization, part design, manufacturability assessment with injection molding simulation, process dependent material assessment and structural validation Source:Nolato

Designing with Engineering Plastics

Weight and cost savings are just as important in the automotive industry as in the electrical/electronics sector, consumer goods and many other industries.

Engineering plastics are often the preferred solution when seeking design freedom to meet the specification of a complex lightweight part as well as saving costs. Innovative plastic materials meet volume, time, and quality requirements. The holistic simulation of engineering plastics is an important building block to tailor the product to the individual requirements. This work presents the steps required to realise reliable engineering plastic solutions more quickly.

Optimize Plastic Parts

Simulation often starts with checking the performance of a mature virtually designed component. However, if the designed component does not meet the performance criteria and if the manufacturability of a material was not taken into consideration, then even the best material cannot compensate for that. A technically state-of-the-art workflow for design and

development of plastic parts considers the correct geometric layout and the design requires to withstand the stresses and strains experienced in operation.

To assure loading and manufacturability compliant design concepts, topology optimization is an important design tool. Most effectively, the component topology is best determined as an initial step. In later development phases, the dimensioning with shape optimization considering local material effects allow further improvement of the component design.

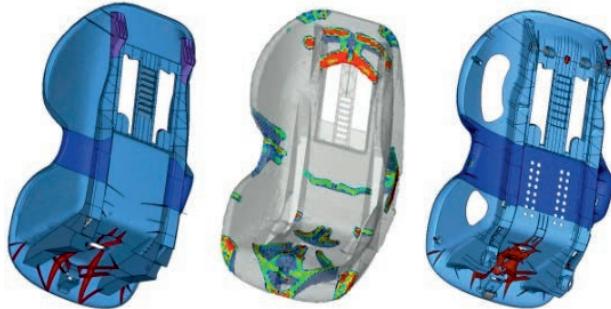


Fig. 2: Result of a topology optimization with injection molding manufacturing constraints, provides the load paths for an efficient and rib pattern concept. Source: Britax

Balance Performance & Manufacturability

Assuring manufacturability early in the design process is important. Understanding how the modification of process parameters results in varying material behavior and allows product quality control. An integrated, comprehensive, state-of-the-art injection molding simulation ensures parts are manufacturable during the design process. This opens a wide range of possibilities to balance performance and manufacturability such as:

- Analyze and modify the part design at the same time optimize for form, fit, and function.
- Analyze mold designs and feed system designs, single and multi-cavity family mold layouts.
- Improve sprue, runner, and gate position to influence fiber orientations and avoid weakening weld lines.

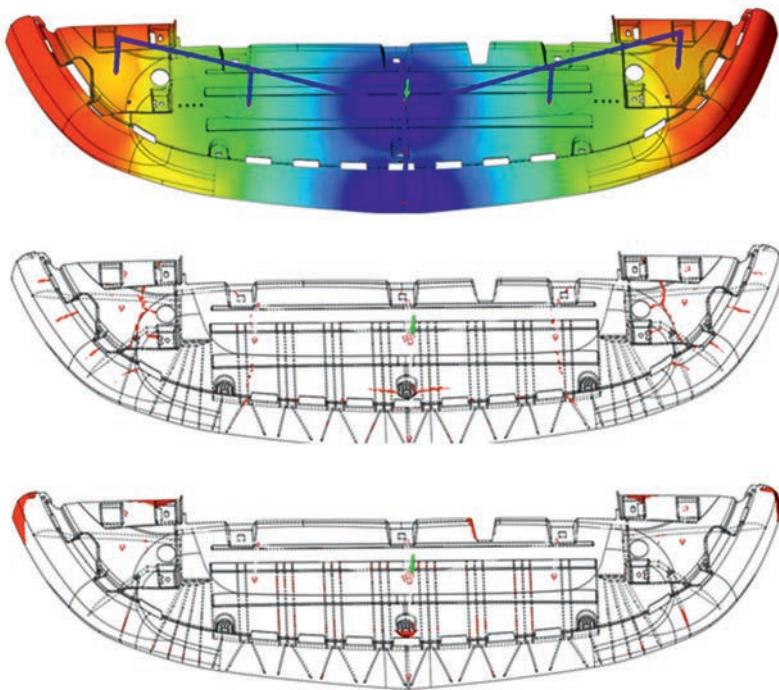


Fig.3. Injection molding simulation for initial manufacturability check; early assessment with fast solver to identify fill time, air traps, weld lines etc. Source: Altair

Material Characterization

In the manufacturing process, the structural properties of the final material are defined by its shape. These depend on the material behavior during the manufacturing process like fluidity, shrinkage, deformation, etc.

Only using an integrated simulation approach allows the engineer to adapt the part design to actively steer this material behavior and unlock the design potential of short fiber-reinforced plastics by exploiting their anisotropic properties.

Master Process-dependent Material Behavior

Developing modern thermoplastic components, various aspects must be considered. . In the context of manufacturing processes, part geometry and material, only a comprehensive and

integrated simulation approach of thermoplastic components assures an ideal component design.

Plastics reinforced with short glass or carbon fibers have anisotropic properties depending on the manner the fibers align during the injection molding process. Modern optimization methods support part design and can improve it in every phase of its development. An appropriate numerical material description can consider the typical characteristics of the plastic in the simulation.

Modelling Anisotropy

In the injection molding process, the flow orients the short-glass fibers. Depending on the plastic used, the geometry of the component and the process conditions, a three-layer distribution of the fibers occurs. On the edge of the component, the fibers tend to lie in the direction of molding, while in the center the orientation is transverse.

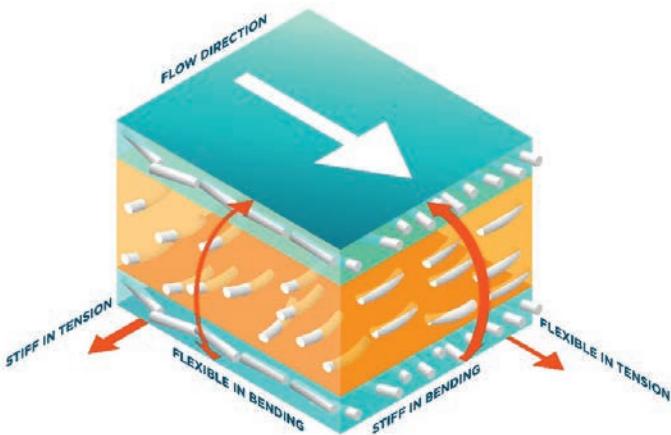


Fig. 4: Schematic of Process dependent fiber orientation and resulting material behavior:

Depending on the plastic used, the geometry of the component and the process conditions, a three-layer distribution of the fibers occurs. On the edge of the component, the fibers tend to lie in the direction of molding, while in the center the orientation is transverse. Source Altair.

The orientation largely depends on the rheological properties. Different layer thickness distributions occur in the component depending on the flow geometry and the viscous effects

of the fluid under consideration. The mechanical properties are greatly influenced by the anisotropic fiber distribution. Depending on the fiber content, both the stiffness and the stress, that can be withstood can differ by a factor of up to 2 depending on the direction.

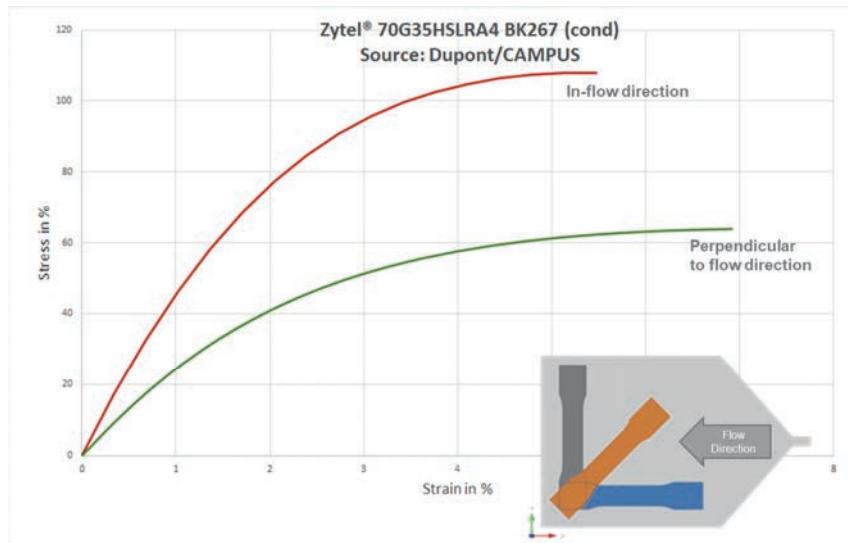


Fig. 5: Process dependent fiber orientation and resulting material behavior:
Orientation dependent Stress Strain Curve source: CAMPUS/DUPONT

Integrative Simulation from Laboratories to all Designers' Desktops

Find or Create Material Data.

Democratized access to high-quality material information for rheological and structural assessment, is the key for development related decisions and that reduces risks and costs when using new materials. Sustainable, efficient, and minimum weight designs can only be achieved through applying multi domain material properties direct from the material supplier upfront in the design process. Direct access to accurate solver-ready data through a common user experience enables designers and engineers to make faster, more informed material decisions.

Overcoming this material data bottleneck is a key enabler for the democratization of the design process.

Material Information Availability

The development of sustainable, efficient, minimum weight designs requires accurate multi-domain material properties. At various stages of the development process different material information is required. The accessibility of the data is a key element of the democratization process. Only when the appropriate information is available, an informed decision can be made, The right material data point for the right decision.

Figure 6 illustrates the elements of a unified Material Database, and at which point in the development process which information is required [6].

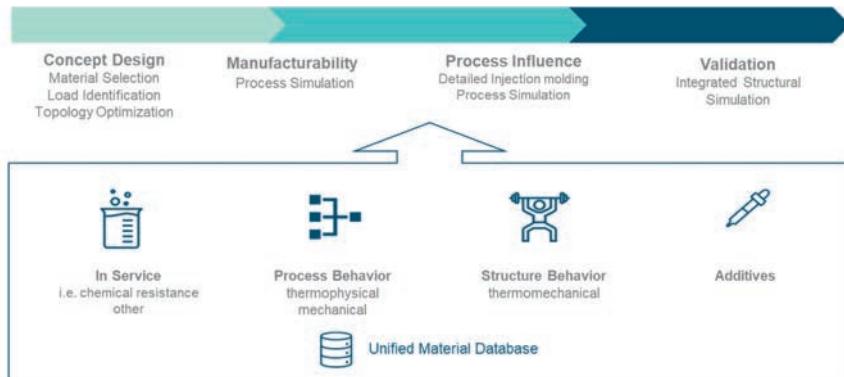


Fig. 6: The right material data point for the right decision. – Elements of a unified Material Database and the information required during different stages of the development process

The Database used in this project is the Altair Material Data Center™, which enables designers, engineers, and scientists to browse, search, and compare materials in a standalone application or through the interface of their simulation and optimization tools.

Accurate Performance Prediction

Accuracy of performance predictions is the key to the design of high-quality manufacturable products. This involves incorporating the manufacturing process with the material development. Considering the manufacturing process is a critical question during the part design.

The final material is “made” during the manufacturing, along with the final properties and all variations therein. A holistic integrated Simulation-Driven Design therefore starts with the injection molding of the plastic component to improve the prediction of its mechanical performance. Using a modern injection molding simulation as a basis, the fiber orientation distribution at each point of the component is transferred to the corresponding elements of the thermo-mechanical simulation model. That enables us to consider the heterogenous anisotropic behavior of the short-fiber reinforced material, by combining the local fiber-orientation tensor with a microscale based material model. That process enables the accurate modelling of:

- heterogenous anisotropy in elastic, inelastic and damage regime
- anisotropic constants of thermal expansion

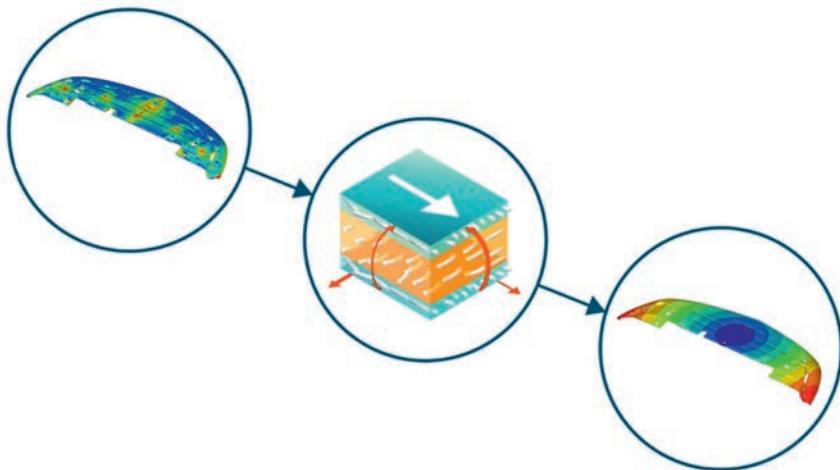


Fig. 7: Simulation-driven design process leveraging an integrated simulation approach: The simulation of the injection molding process provides the fiber distribution, that is considered in the material property to improve the prediction quality of the structural assessment of the part.

Fiber orientations in the filling simulation depend on rheological properties of the melt and the cavity geometry. Longitudinal flows orientate the short-glass fibers radially around the injection point, whereas shear flows, influenced by the cavity cross section, result in rotation of the fibers.

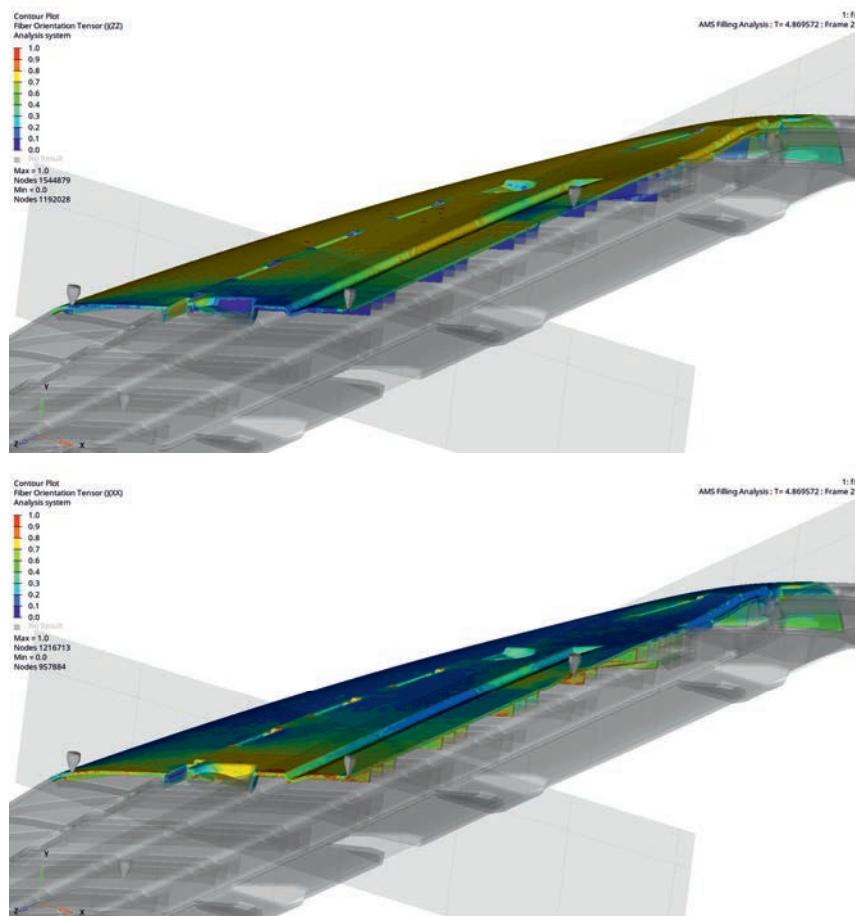


Fig. 8: Detailed Injection molding simulation for fiber orientation prediction; Predicted fiber-orientation tensor: a_{xx} and a_{zz} in global coordinate system source: Altair

Efficient Material Modelling

Capturing micromechanics effects of a fiber-reinforced material in a macroscopic FEA representation with reasonable numerical costs is a key element of the Simulation Strategy. Based on the direction-dependent fiber distribution induced by the injection molding process, the mechanical performance is also described as anisotropic using an integrated simulation approach. Altair Multiscale Designer™ was used in the example to increases the precision of

the simulation results. By combining a 3D model of a single fiber in the plastic, the plasticity and damage laws of the fiber and the plastic materials, and the statistical distribution of the fibers in the plastic, the behavior of the reinforced plastic can be characterized accurately. The fiber orientation distribution of the whole component is determined with a beforehand analysis of the injection molding process. Multiscale Designer's material models can be used in implicit and explicit analyses in Altair OptiStruct and Altair Radioss as well as other 3rd party FEA solvers like ABAQUS, Ansys, LS-Dyna.

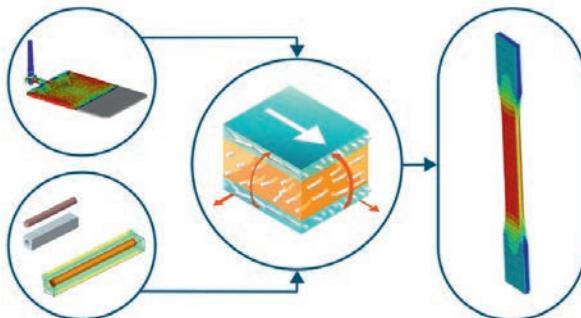


Fig. 9: Efficient Material Modelling: Simulation-driven Design of short fiber-reinforced plastic parts leveraging manufacturing influences in an integrated simulation approach.

Source: Altair

Plastic is more complex than steel! This simple rule applies particularly to failure behavior. Properties are nonlinear elastic, load-rate and temperature-dependent, cyclic loading can cause heating and softening. Plastics components behave very differently when under compression or tension. The same applies for loads applied along and perpendicular to the fiber direction: plastic fails in terms of anisotropy!

Meaningful Models

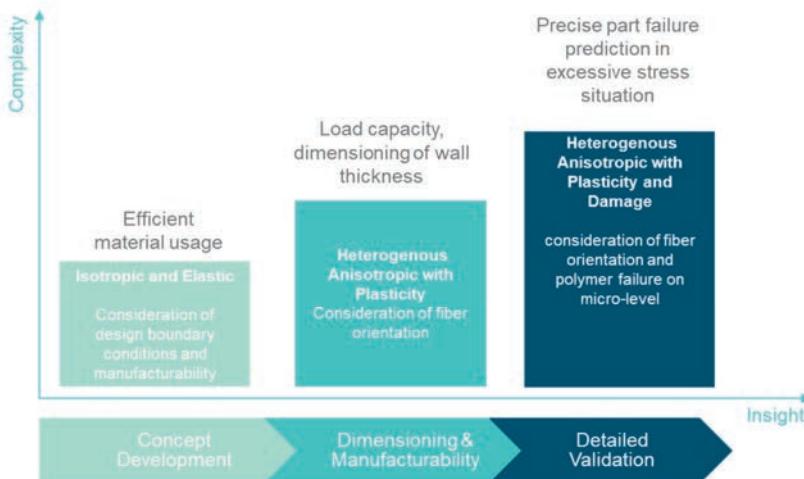


Fig. 10: Modeling effort, computing resources vs. engineering insight - What to simulate when? Source: Altair

What to Simulate When?

The more insight needed for plastic components, the higher the complexity of the simulation method. For a development, questions like "What effort do I need to put into this?" or "What do I look at and when?" or "What can be simulated at all?"

What to do depends on the objective of each development phase. In the concept development phase, it is about using materials more efficiently and linear isotropic formulation of materials is sufficient for that. Decisive is the consideration of boundary conditions of shaping; load, packaging, functionality. The application of topology optimization is predestined for this. Later comes the dimensioning phase, mainly to ensure the load capacity of the component and to dimension the wall thicknesses. When it comes time to investigate manufacturability, then the fiber orientation must be considered. The models consider the heterogenous anisotropic characteristics of the short fiber reinforced materials, as well as the weakened material in the weld lines as one example of process induced defects. The Multiscale Designer Material Model considers the elastic anisotropic behavior in thermomechanical regime. For example, for a dynamic analysis of the component or anisotropic warping analysis. It can also be easily extended with the plasticity calculated on microlevel (Matrix) in each element, if required for

the design evaluation. In the later stages of the development detailed consideration of the behavior under overstress and failure behavior is important. Also, that part is covered by the same Multiscale Designer Material Model used in the earlier stages. The damage is calculated in each element of the simulation on micro-level (fiber or matrix), taking into account the ductile, as well as the volumetric brittle damage behavior of the material. These material models can be hooked into implicit solvers (Optistruct, Abaqus, Ansys) as well as explicit solvers (Radioss, Abaqus, LS-Dyna) without any change.

In the end it is also about "don't use a sledgehammer to crack a nut!"

Benefits of Democratization of Integrative Simulation of Short Fibre-reinforced Plastics

The innovation foundation for the development of plastic parts presented is enabling the democratization of the integrative simulation of short fiber-reinforced plastics:

The elements of the democratization are:

- Accessibility to the required material Information
- Connecting the engineering disciplines: design, manufacturing, and material science
- Collaboration in a comprehensive and open process environment

The simulation platform for the design of polymer components is based on load analysis, manufacturability checks, material response, and process optimization. It provides a powerful tool for concurrent engineering. Supporting digital product development and data-driven decisions, Altair strives for nothing less than redefining the development of plastic injection molded parts. Driving the digitalization of the industry there is great potential for saving hundreds of thousands of tons of material while designing more sustainable products in quicker time with a reduced development risk.

The Altair process for the entire development of injection molded components is an open environment. Using the multiscale technology for the material modeling ensures high accuracy of results. All necessary simulation steps can be done with Altair tools and within the Altair licensing system. A proprietary solution for injection molding or structural assessment can be seamlessly integrated. The Altair Workflow also supports existing processes and interfaces seamlessly with third-party tools like Moldflow, Moldex3D, as well as Abaqus, LS-Dyna or Ansys.

Conclusions

On the route to democratize performance and manufacturability simulation, a key step is Altair's Workflow for design of short fiber-reinforced thermoplastic parts employing holistic, integrative simulation.

The open and flexible environment allows to use the right model, for the right decision, at the right time. Following the George E. P. Box principle [7] "All models are wrong, but some are useful".

This way meaningful models are created, applied, and enable an accelerated product development.

- Higher fidelity is not always the better model especially in early stages.
- The least complex model with fewer physics as possible answers questions quicker
- Access to reliable material data for the usability, process and performance metrics is a key democratization element enabling target negotiation, trade-off evaluation, and 'what if' exploration.

All these factors increase decision-making confidence and speed by solving multiple physics problems for an entire product design!

Acknowledgement and Thanks

Britax, Daimler, SMP, Nolato, The Altair Management

References:

- [1] Glaser, S.: Integrative Simulation. Vom Polymer über den Prozess zum Bauteilverhalten. VDI-Tagung Baden-Baden, 2004.
- [2] Adam, L., Assaker, R., 2014. Integrated nonlinear multi-scale material modelling of fiber reinforced plastics with Digimat: Application to short and continuous fiber composites, in: Proceedings of the 11th World Congress on Computational Mechanics, pp. 20–25.
- [3] Bykowski, S., et. al., High Performance Plastic Components for Engine Mount Applications, 2008
- [4] J. McGuire, Using Moldflow and ULTRASIM® for Superior Mechanical Simulations – Recent Developments, Moldflow Summit 2017
- [5] Mayavaram R. et. al., Predicting Fiber Orientation in Short Fiber Reinforced Injection Molding Process using Discrete Element Method, SPE - ANTEC 2020At: San Antonio, TX
- [6] <https://www.altair.com/material-data-center/>
- [7] George E. P. Box Box in Journal of the American Statistical Association.

Interior parts with a focus on climate

A pleasant feel thanks to thermoplastic foam

Jana Horn, Sebastian Pirl, GK Concept GmbH, Dresden;
Manuela Gehringer, Frank Förster, ALLOD Werkstoff GmbH & Co. KG, Burgbernheim

Abstract

Soft surfaces for trim parts in automotive interiors have long been standard in middle- and luxury-class vehicles. Their three-layer structure (decor, foam, carrier) creates both effort and costs in production and in recycling.

The approach of development work here was to reduce the number of layers and to focus on just one material group – thermoplastics. The desired soft-touch effect was achieved by means of thermoplastic foaming, which entails the risk of streak formation and other surface defects. These had to be eliminated by material modification and process control. Energy- and cost-intensive processes and plant technology such as gas back-pressure and variothermy were deliberately eschewed. The project consortium, consisting of GK Concept GmbH, ALLOD Werkstoff GmbH & Co. KG, ARBURG GmbH and FRIMO GmbH, is shown in Fig. 1.

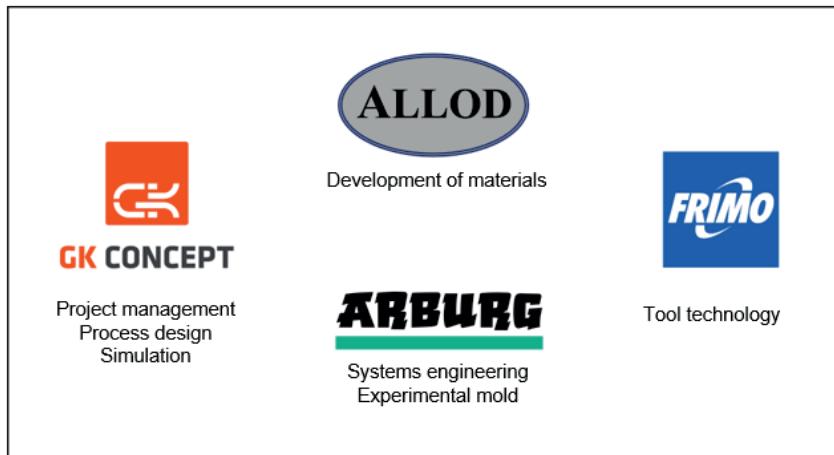


Fig. 1: Project consortium and responsibilities

1. Motivation

In addition to cost efficiency and weight reduction, the requirements for future automotive components are increasingly focusing on the topics of the CO₂ footprint and recyclability.

Previous standard solutions for interior components with soft-touch surfaces consist of three layers of different material groups, which means complex manufacturing processes with corresponding costs and considerable problems with recycling. If a single-step production process with no semi-finished products could be achieved, a significant cost reduction would be possible. This offers the opportunity of upgrading the interior of even lower-class vehicles for a pleasant user experience. In addition there is at the end of their service life the option of recycling the components as raw material for new injection-molded parts. In addition to the weight reduction achieved by foaming the component, the PP/TPE combination offers a low output density of approx. 0.90 g/cm³. In contrast, materials in current use have densities between approx. 1.10 and 1.25 g/cm³. Here, weight savings can already be achieved by adapting the material system.

2. Process description

The basic idea of the current development is not entirely new – the use of the gas pressure of a thermoplastic melt charged with blowing agent to create a foam with a closed surface in the injection mold by means of an opening stroke. With soft thermoplastics it is difficult to create a homogeneous foam with fine cells. Previous applications have had a comparatively high mass and hardness. The biggest challenge, however, was to reduce or prevent the surface defects typical of TSG injection-molding without recourse to complex special processes such as gas back-pressure or variothermic tool temperature control.

In thermoplastic foam injection molding (TSG), a distinction can be drawn between low-pressure and high-pressure TSG processes. In the tests carried out for TPE foaming, the high-pressure TSG process was used. In the literature this method is referred to as the breathing mold [1], core back, negative embossing, and so on.

The mechanisms of foam structure formation and the associated process steps in the high-pressure TSG process are shown in Fig. 2.

Particularly noteworthy in the high-pressure TSG process is the possibility of decoupling cell structure formation from the filling process. The deliberate initiation of cell formation takes place via the opening stroke or the expansion of the mold cavity and the associated pressure drop. The mechanisms of cell formation occurring during the filling process as a result of

temperature and pressure change should be minimized as far as possible. The holding-pressure phase is used on the one hand to control the outer layer thickness and on the other hand to control a homogeneous temperature and pressure distribution in the mold cavity. The homogeneity of the cell structure under formation depends on the process side on the homogeneity of the temperature and pressure conditions prevailing at the time of expansion as well as on a homogeneous distribution of the blowing agent. The inhomogeneities occurring in the injection-molding process had to be minimized on the process side and intercepted on the material side with regard to the homogeneity of the cell structure.

Process steps		Mechanisms of foam structure formation
Plastification / metering		Mixing / solvation 1
Injection		At the melt front Nucleation 1 / cell growth 1 / stabilization 1
Volumetric filling		Behind the melt front Compression
Holding pressure		Compression / solvation 2
Opening stroke		Nucleation 2 / cell growth 2
Cooling		Stabilization 2

Fig. 2: Process steps and mechanisms of cell structure formation

3. Material

Thermoplastic elastomers (TPE) are extremely well suited to producing multi-component hybrid components. For this reason this group of materials can be found in articles in many areas of life. In automobiles, they can be found in exterior applications, for example in water drainage strips, in the interior, for example, as grip areas for control elements and in the chassis or engine compartment TPE they are also used for complex multi-component parts with a sealing and bellows function.

Amongst TPEs, thermoplastic styrene elastomers are in terms of quantity one of the largest groups with a good price/performance ratio. With these TPEs we have a three-block structure with an olefinic or aliphatic soft segment between hard polystyrene end blocks. The polymeric styrene has an amorphous structure. Under the influence of temperature it softens very slowly and is therefore very stable as a hard phase and a physical crosslinking site. To permit rational thermoplastic processing, it is cut with plasticizers and/or thermoplastic polymers. This is usually polypropylene (PP). The resulting network determines the viscoelastic behavior and the rubber-like properties.

Essential as regards technical use is compounding in a twin-screw extruder. Due to the high variation in the formulation composition, these thermoplastic elastomers offer a very interesting range of capabilities.

When TPEs are used in thermoplastic foam injection molding, the foam quality is also directly dependent on the material. Classic injection-molding TPE grades can only offer unsatisfactory foaming results.

Common TPE injection-molding materials have only a low melt extensibility. Even with low levels of foaming, cell walls can tear open.

The flow behavior of the polymer melt under strain has a very strong effect on the foam formation process. The material modifications which have been developed are intended to achieve a higher melt extensibility and elasticity. As a result, a more homogeneous cell structure and greater density reductions are feasible.

Nucleating agents are of further importance for the resulting foam structure. They increase nucleation density and the nucleation rate of the gas bubbles [2]. Passive nucleating agents in the TPE compounds can be used here to improve cell formation.

In order to counteract climate change and reach the binding climate targets laid down in the political sphere, many companies have implemented a climate management system in recent years and are seeking to drastically reduce their emissions over the coming years. The CO₂

footprint will therefore in the near future become a factor in the award of new projects. Currently ISO 14067 is a framework for calculating the CO₂ equivalent and in detail supports different calculation methods.

Calculated according to ISO 14067, the product CO₂ footprint of a standard 60 ShA TPS compound, for example, is 2.83 kg CO₂e/kg TPE (cradle to grave). The CO₂ footprint can be broken down into different components: 2.63 kg CO₂e/kg TPE for the production of the raw material; 0.09 kg CO₂e/kg TPE, for transportation of the raw material; and 0.11 kg CO₂e/kg TPE-S for the compounding process. In combination with reduced process effort, savings with regard to greenhouse gas emissions for trim parts should be made possible in the future.

The sandwich structure consisting of a single material permits simple recycling approaches without devaluing the mixture of substances. The advantage of using TPE in its combination with PP as a composite material is that this gives a mono-material system. In principle, regrind can be added to the TPE materials.

Table 1: Properties of the TPE compounds

Properties TPE compound	Test specification	Specific value
Hardness	DIN ISO 48-4	from 65 Shore A
Density	DIN EN ISO 1183-1	from 0.90 g/cm ³
Longitudinal tear strength	DIN 53 504	> 5.0 MPa
Longitudinal elongation at break	DIN 53 504	> 330%

Furthermore, the TPE compounds must satisfy the interior requirements in automobiles with regard to emissions, fire behavior, and sunlight and heat resistance.

Table 2: Properties of the TPE compounds for interior use

Properties TPE compound	Test specification	Specific value
Odor	VDA 270, Variant 3	score ≤ 3.5
Fogging	DIN 75201, Method B	≤ 2 mg
Emission of organic compounds	PV 3341	≤ 30 µg/C
Fire behavior	DIN 75 200, thickness 2 mm	< 100 mm/min
Xenon test	DIN EN ISO 105-B06, Condition 3, 3 cycles	gray scale > 4
Heat resistance	100 °C / 48 h	no visual change

TPE materials have an excellent bond strength with PP.

The great advantage of TPE compounds is their variability with regard to material bonding with other thermoplastics such as ABS.

4. Tests and influencing factors

The initial situation at the start of the tests was that soft foam structures made of TPE were producable by high-pressure TSG, but that they lacked both homogeneity over the entire flow path and a defect-free surface.

The aim of the project was to optimize the process and material configuration to the point that the desired properties could be achieved in combination at the same time and also to find starting points in order to be able to estimate in the future the expected component quality by means of process simulation.

In the investigations carried out, the process and material variables influencing component quality were first analyzed in a one-component process. An experimental mold from ARBURG specially designed for TSG applications was used for these tests. This tool was developed for ARBURG by GK Concept, built by PMT Technology GmbH (now part of FRIMO) and again equipped with special inserts by FRIMO GmbH for the tests.

The molded part is shown in Fig. 3. Injection was realized via a film, the flow path length being approx. 450mm. A starting wall thickness of 2.3mm was chosen for the investigations. The final wall thickness was given by the starting wall thickness plus the respective opening stroke. The mold cavity was sealed during the opening stroke (expansion) by means of a spring-loaded frame plate. With this tool concept, the opening movement of the mold and thus the expansion of the mold cavity must take place via the machine movement. This means heavy demands on the accuracy of tool positioning. For this reason, the tests were carried out on a machine with an electrical clamping unit.

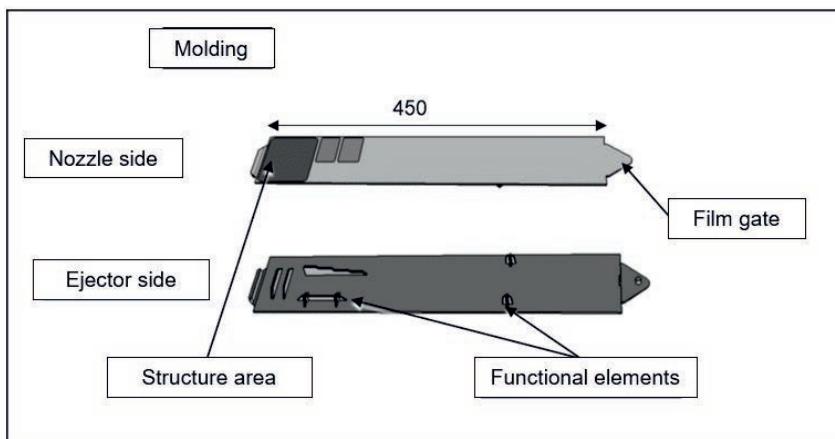


Fig. 3: Arburg TSG component - experimental mold

The focus of the investigations was on the production of homogeneous foam structures (haptics) and high-quality surfaces (optics). The influence of the following parameters was examined here:

- Process:
 - Injection speed, processing temperature, mold temperature, holding pressure level, holding pressure duration, expansion ratio (opening stroke), expansion rate (opening speed)
- Blowing agent:
 - Blowing agent category: chemical / physical, type, blowing agent content
- Material:
 - Basic hardness, filler content, molecular structure
- Component / tool geometry
 - Flow path length, structuring (grain), wall thicknesses

Due to the large number of parameters and the complex interrelationships between them, the influence on component quality is described in the following section with the aid of specific defect patterns and strategies for their prevention. The defect patterns shown in Fig. 4 have emerged as characteristic during the course of the investigations.

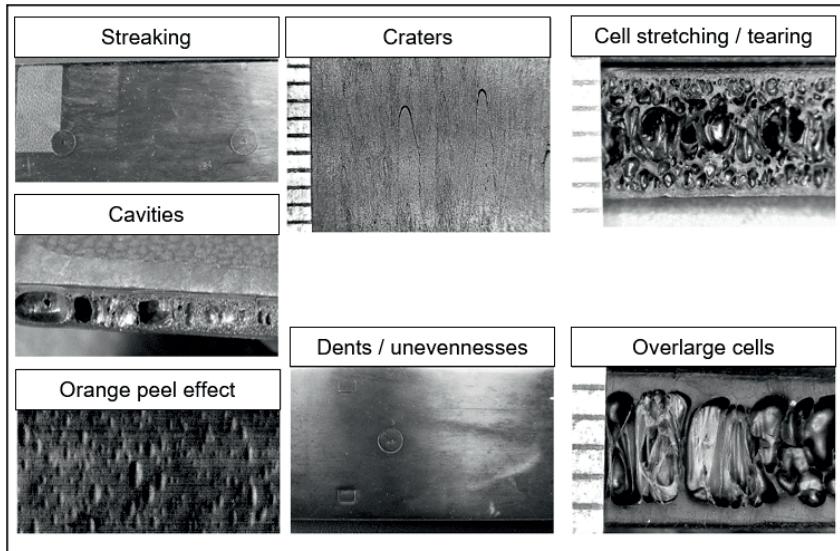


Fig. 4: Defect patterns during the foam injection molding of TPE

Streaking / craters

Streaking and craters on the component surface result from the mechanisms of foam structure formation during the filling process. The pressure drop at the melt front leads to nucleation and the growth of cells, which are conveyed by the source flow to the mold wall and stretched by the melt as it flows by. In some cases, the bubbles tear open immediately at the mold cavity wall and are visible as streaks. Cells, which have been deformed by the shear load only after solidification, manifest in the form of craters. During the investigations the following emerged as possible strategies for their reduction or prevention:

- Increasing the injection rate
- Reducing the processing temperature
- Increasing the mold temperature
- Reducing the blowing agent content
- Using chemical blowing agents
- Molecular structure: increasing melt elasticity, increasing elongation hardening

- Reducing the flow path length
- Structuring visible surfaces
- Thermal separation layers → Coating in the cavity:

Orange peel effect

Minor unevennesses in the form of depressions over the entire component surface which occurred during the tests are referred to as the orange peel effect. These depressions can occur as a result of a combination of inadequate outer layer stability, a too coarse cell structure and insufficient gas pressure.

Parameters that increase the stability of the outer layer and reduce the cell size of the foam structure can be used to optimize this defect pattern. The parameters for influencing cell sizes are described in a later section while only the parameters for stabilization of the outer layer will now be addressed:

- Reducing the processing temperature and mold temperature
- Increasing the holding pressure time
- Increasing the basic hardness of the material
- Increasing the filler content

Dents / unevennesses

In contrast to the orange peel effect, this defect pattern rather concerns large-scale inhomogeneities, in the form of depressions, on the component surface. The reason for this is insufficient expansion in these areas. Ways of preventing it are:

- Reducing the holding pressure time
- Increasing the blowing agent content
- Using nitrogen as a physical blowing agent

Voids

Larger contiguous bubbles were observed as voids in an otherwise fine foam structure. This defect pattern increasingly occurred towards the end of the flow path. The cause is suspected to lie in the nucleation that is already starting during the injection process and in the growth of cells which cannot be sufficiently compressed by the holding pressure and brought back into solution [3]. The strategies for reducing the formation of voids during the filling process largely the same as those for reducing streaking. Other approaches to reducing voids:

- Increasing the holding pressure
- Increasing the holding pressure time [3]

Cell stretching and tearing

During the expansion of the mold cavity and the nucleation and cell growth initiated with it, the expandable melt in the core is exposed to a multi-axis strain. If the present melt elasticity, which depends, among other things, on the temperature prevailing in the core, is exceeded under these stresses, the cell walls will tear. Overstretched or torn cells have a negative influence on the feel of the surface in that they reduce the resilience of the foam structure. Likewise, dents in the surface can occur in the areas where cell structures are torn, since the soft TPE outer layer is pushed outwards by the gas pressure. Strategies for reducing or preventing this defect pattern are:

- Increasing the holding pressure time
- Reducing the expansion ratio (opening stroke)
- Reducing the expansion rate (opening speed)
- Molecular structure: increasing melt stretchability and elasticity
- Reducing the flow path length

Overlarge cells

In order to achieve a pleasant feel of the TPE surface, the aim of the experiments was to produce foam structures that are as fine-celled as possible. It was possible to achieve this with the following parameters, among others:

- Increasing the holding pressure
- *Increasing the holding pressure time*
- Increasing the expansion rate (opening speed)
- Increasing the blowing agent content
- Using nitrogen as the blowing agent type
- Increasing the filler content
- Molecular structure: increasing melt stretchability and elasticity

Summary of the influences on haptics and optics:

To achieve a pleasant feel, a density of no more than 50% of the compact density was sought. With a starting wall thickness of 2.3mm this requires an opening stroke of at least 2.3mm. The compact outer layer thickness was 0.4 – 0.7mm, depending on the TPE type used. The thickness of the expandable molten core thus lay within the range of 1.5 – 0.9mm. The maximum possible opening strokes (without tearing the cells) were up to about 10mm, resulting in a density reduction of up to 80% of the compact density.

In addition to the basic hardness of the material, the feel of the TPE surface can be significantly influenced by the opening stroke. The impression forces at different opening

strokes are shown in Fig. 5. It can be seen that in the test pieces with a larger opening stroke, a greater deformation is possible with the same force.

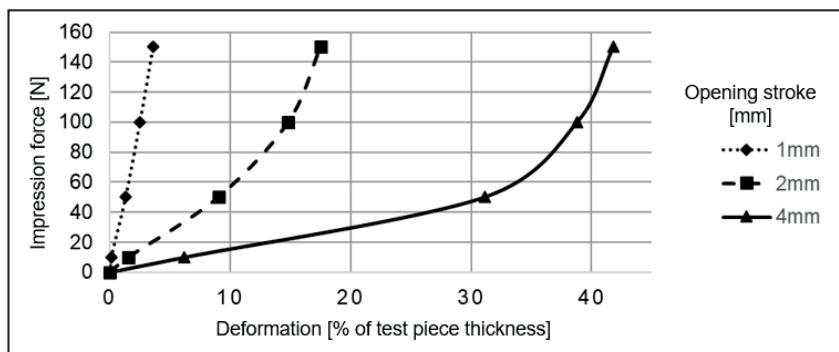


Fig. 5: Pressure tests on test pieces with different opening strokes

In the project, comprehensive investigations were carried out for different material variants, in which the influencing variables listed in Section 4 were systematically varied and analyzed. As a result, sample parts could be produced that had a homogeneous soft foam over the entire flow path length and a streak-free surface.

Fig. 6 shows images of the surface and of the foam structure.

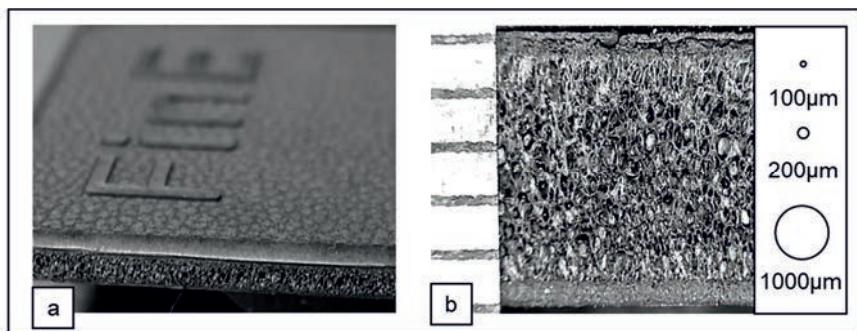


Fig. 6: a: streak-free surface; b: homogeneous foam - with 3mm opening stroke

5. Simulative advance planning and monitoring of experiments

Rheological simulations were carried out ahead of and during the tests in order to be able to make qualitative predictions regarding the influence of the process parameters on foam structure formation on the one hand and to validate these predictions on the basis of the real test results on the other hand. The calculations were performed with CADMOULD, while the required material data were provided by Allod.

From the rheological simulation, the parameters influencing foam structure formation were investigated in the run-up to the experiments. Among other things, the bubble radius in the interior can be used as the output value from the simulation. This increases due to the pressure drop at the melt front and can be influenced by the process parameters. A reduction in the bubble radius can be achieved, for example, by raising the injection rate or by lowering the melt temperature. A comparison of the simulation results of this variation is shown in Fig. 7. These tendencies in the simulation results correlate with observations made during the real experiments.

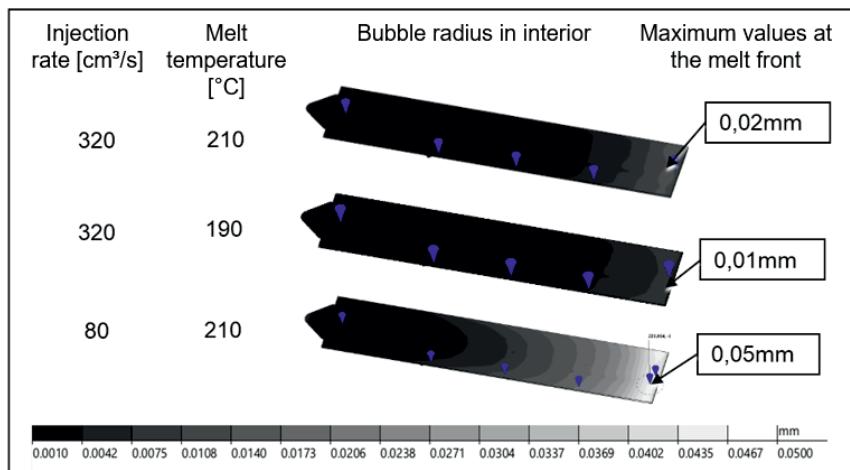


Fig. 7: Bubble size at the melt front as an indicator of streak formation

Furthermore, the simulation can be used to record the development of the outer layer thickness over the holding pressure time and to define the optimal point in time for the opening stroke. This will depend on the material properties and the minimum outer layer thickness. Fig. 8 shows by way of example the temperature distribution over the component

cross-section at different points in time. Assuming that an outer layer of 0.6mm is required, the point in time for the expansion of the cavity will be approx. 6.5s (after the start of injection).

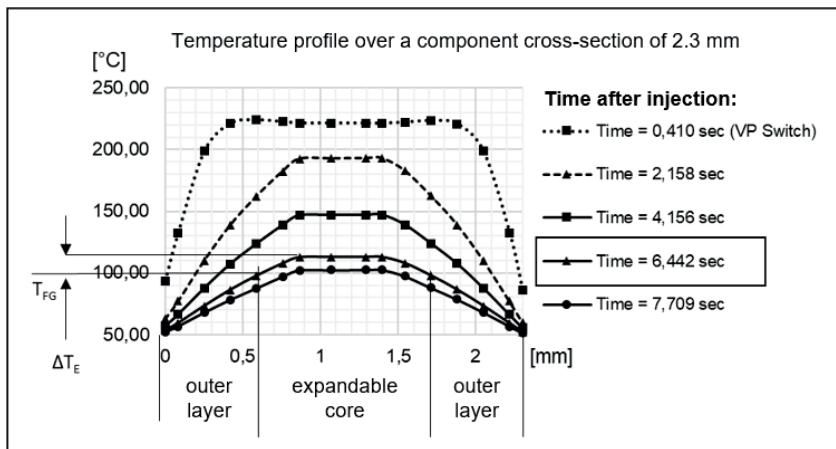


Fig. 8: Development of the outer layer thickness over time; T_{FG} : yield point temperature; ΔT_E : expansion temperature window

If this point in time can be recorded in a simulation, conclusions about the homogeneity of the temperature and pressure distribution at the point in time of the opening stroke can be drawn from the simulation results. It can thus be seen in Fig. 8 that for this point in time at this position inside the component a temperature delta for the expansion (ΔT_E) results. Whether a homogeneous foam structure can form within this temperature window without tearing the cells is determined by the material characteristics (melt elasticity, extensively stretching-viscosity properties) and the stress caused by the opening stroke.

Bild 9 shows a comparison of the calculated temperature distribution at the time of the opening stroke and also a real component with clearly visible areas in which there are torn cell structures.

If for the material ΔT_E in the form of the freezing temperature $T_{E\text{Min}}=T_{FG}$ is known as the lower limit and the upper limit $T_{E\text{Max}}$ (cells do not tear) for a defined opening stroke, it will be possible to derive the areas of inhomogeneities from the simulation. No expansion of the core is to be expected for the areas below the glass transition temperature. For this example

a temperature of 130°C was defined as the upper limit in the case of an opening stroke of 3mm. In those areas in which this temperature is exceeded, the cell structure will tear.

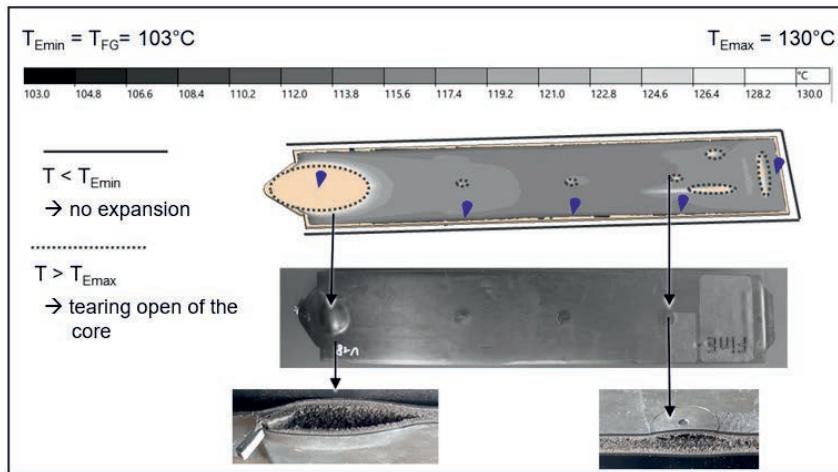


Bild 9: Temperature distribution during the opening stroke: comparison of simulation and real component

6. Outlook and possible applications

With the high-pressure thermoplastic foam injection molding used in the project, it is possible to reduce the process steps in the production of foamed visible components in the automotive interior that have a pleasant feel. In addition, weight savings of up to 80% can be achieved in the foam component compared to compact material, which is a clear advantage with regard to current environmental discussions. This is because a weight reduction of just 100 kg reduces CO₂ emissions by around 10 grams per kilometer traveled [4]. In addition to weight reduction, the correct selection of the material system (e.g. PP/TPE) allows the component to be returned to the cycle as a material system at the end of its life. The soft, pleasant surface and the ideal suitability for processing in two-component injection molding bring interior components such as windowsill trims, arm and knee rests into focus.

The extensive basic work undertaken in the project has shown that soft visible surfaces can be realized with TPE. It became clear that the balance between haptics and optics requires precise knowledge of the material system and a process that is perfectly tailored to the component. On the basis of the simulation results, it will be possible in future to forecast the expected foam quality using process simulations. For a potential use in large-scale production, however, further tests are necessary, such as for abrasion, scratch and cream resistance as well as cleaning behavior. Further areas of potential can also be seen in the damping of vibrations and also in the increased thermal insulation provided by the foam.

7. References

- [1] A. M. Volker Altstädt, Thermoplast-Schaumspritzgießen [Thermoplastic foam injection molding], Munich: Carl Hanser Verlag, 2010.
- [2] J. Stange, Einfluss rheologischer Eigenschaften auf das Schäumverhalten [Influence of rheological properties on foaming behavior], Erlangen, 2006.
- [3] M. Tromm, Controlling cellular structure in thermoplastic foam injection molding, Kassel: Uni Kassel, 2020.
- [4] PlasticsEurope AISBL, Automotive. The world moves with plastics, Brussels, 2018.

Interieurteile im Klimafokus

Angenehme Haptik durch thermoplastischen Schaum

Jana Horn, Sebastian Pirl, GK Concept GmbH, Dresden;
Manuela Gehringer, Frank Förster, ALLOD Werkstoff GmbH & Co. KG, Burgbernheim

Kurzfassung

Weiche Oberflächen für Verkleidungsteile im automobilen Interieur sind in den mittleren und oberen Fahrzeugklassen schon länger Standard. Ihr Aufbau aus 3 Lagen (Dekor, Schaum, Träger) erzeugt Aufwand und Kosten bei der Herstellung und beim Recycling.

Ansatz der Entwicklung war die Reduktion der Anzahl der Schichten und der Fokus auf nur eine Materialgruppe – die Thermoplaste. Die Realisierung der angestrebten weichen Haptik erfolgte mittels des thermoplastischen Schäumens, das das Risiko von Schlierenbildung und anderen Oberflächendefekten mit sich bringt. Diese galt es durch Materialmodifikation und Prozesssteuerung zu eliminieren. Auf energie- und kostenintensive Prozesse und Anlagentechnik wie z.B. Gasgegendruck und Variothermie wurde bewusst verzichtet. Das Projektkonsortium, bestehend aus GK Concept GmbH, ALLOD Werkstoff GmbH & Co. KG, ARBURG GmbH und FRIMO GmbH, ist in Bild 1 dargestellt.



Bild 1: Projektkonsortium und Verantwortlichkeiten

1. Motivation

Die Anforderungen an künftige automobile Komponenten fokussieren sich neben Kosteneffizienz und Gewichtsreduktion zunehmend auf die Themen CO₂-Fußabdruck und Recyclingfähigkeit.

Bisherige Standardlösungen für Interieur-Bauteile mit Softtouch-Oberfläche bestehen aus 3 Schichten verschiedener Materialgruppen, was aufwändige Herstellprozesse mit entsprechenden Kosten und erhebliche Probleme beim Recycling erzeugt. Wenn es gelingt, einen einstufigen Fertigungsprozess ohne Halbzeuge zu realisieren, ist eine deutliche Kostenreduktion möglich. Dies bietet die Chance, das Interieur auch in unteren Klassen für ein angenehmes Nutzererlebnis aufzuwerten. Zudem die Option, die Bauteile nach dem Ende der Lebenszeit wieder als Rohmaterial für neue Spritzgussteile zu verwerten. Neben der Gewichtsreduktion durch das Aufschäumen des Bauteils bietet die Kombination PP/TPE eine geringe Ausgangsdichte von ca. 0,90 g/cm³. Im Gegensatz dazu weisen aktuell genutzte Materialien Dichten zwischen ca. 1,10 und 1,25 g/cm³ auf. Hier lässt sich also bereits durch das Anpassen des Materialsystems eine Gewichtseinsparung erzielen.

2. Prozessbeschreibung

Die Grundidee der aktuellen Entwicklung ist nicht völlig neu: Die Nutzung des Gasdrucks einer Treibmittel-beladenen thermoplastischen Kunststoffsenschmelze, um mittels Öffnungshub im Spritzgiesswerkzeug einen Schaum mit geschlossener Oberfläche zu erzeugen. Mit weichen Thermoplasten ist das Herstellen eines feinzelligen gleichmäßigen Schaums schwierig. Bisherige Anwendungen weisen eine vergleichsweise hohe Masse und Härte auf. Die größte Herausforderung bestand aber darin, die für den TSG-Spritzguss typischen Oberflächendefekte ohne die Nutzung von aufwendigen Sonderverfahren wie beispielsweise Gasgegendruck oder variotherme Werkzeugtemperierung zu reduzieren oder zu vermeiden.

Beim thermoplastischen Schaum-Spritzgießen (TSG) kann zwischen dem Nieder- und dem Hochdruck TSG Verfahren unterschieden werden. Bei den durchgeführten Versuchen zum TPE-Schäumen wurde das Hochdruck TSG Verfahren genutzt. Dieses Verfahren wird in der Literatur unter anderem als: Atmendes Werkzeug [1], Core Back, Negativ-Prägen etc. bezeichnet.

Die Mechanismen der Schaumstruktur-Bildung und die dazugehörigen Prozessschritte im Hochdruck TSG Verfahren sind in Bild 2 dargestellt.

Besonders hervorzuheben ist beim Hochdruck TSG Prozess die Möglichkeit der Entkopplung der Zellstruktur-Bildung vom Füllprozess. Die gezielte Einleitung der Zellbildung erfolgt durch den Öffnungshub bzw. die Expansion der Kavität und dem damit einhergehenden Druckabfall. Die während des Füllprozesses auftretenden Mechanismen der Zellbildung infolge von Temperatur und Druckänderung sollten dabei weitestgehend minimiert werden. Die Nachdruckphase wird einerseits zum Steuern der Randschichtdicke und andererseits zum Steuern einer homogenen Temperatur- und Druckverteilung in der Kavität genutzt. Die Homogenität der sich ausbildenden Zellstruktur ist prozessseitig von der Homogenität der, zum Zeitpunkt der Expansion, vorliegenden Temperatur- und Druckbedingungen sowie einer homogenen Treibmittelverteilung abhängig. Die im Spritzgießprozess auftretenden Inhomogenitäten galt es prozessseitig zu minimieren und materialseitig in Hinblick auf die Homogenität der Zellstruktur abzufangen.

Prozessschritte		Mechanismen der Schaumstruktur Bildung
Plastifizieren / Dosieren		Mischen / Lösen 1
Einspritzen		An der Schmelzefront: Nukleierung 1 / Zellwachstum 1 / Stabilisierung 1
Volumetrische Füllung		Hinter der Schmelzefront Komprimieren
Nachdruck		Komprimieren / Lösen 2
Öffnungshub		Nukleierung 2 / Zellwachstum 2
Kühlen		Stabilisierung 2

Bild 2: Schematische Abbildung der Prozessschritte und der auftretenden Mechanismen der Zellstruktur-Bildung

3. Material

Thermoplastische Elastomere (TPE) eignen sich außerordentlich gut Mehrkomponenten Hybridbauteile herzustellen. Weshalb diese Materialgruppe in Artikeln in vielen Lebensbereichen anzutreffen ist. Im Automobil finden sie sich in der Außenanwendung, z.B. bei Wasserfangleisten im Interieur beispielsweise als Griffzonen bei Bedienelementen und im Chassis oder Motorraum kommen TPE auch für komplexe Mehrkomponenten Bauteile mit Dicht- und Balgfunktion zum Einsatz.

Eine der mengenmäßig größten Gruppe mit gutem Preis-/Leistungsverhältnis bei den TPE bilden die Thermoplastischen Styrol-Elastomere. Bei diesen TPE spricht man von einem Dreiblockaufbau mit einem olefinischen oder aliphatischen Weichsegment zwischen harten Polystyrol-Endblöcken. Das polymere Styrol hat eine amorphe Struktur. Es erreicht unter Temperatur sehr langsam und ist deshalb als Hartphase und physikalische Vernetzungsstelle sehr stabil. Damit das TPE thermoplastisch vernünftig verarbeitet werden kann, wird es mit Weichmachern und/oder mit thermoplastischen Kunststoffen versetzt. Dies ist in der Regel Polypropylen (PP). Das so entstehende Netzwerk bedingt das viskoelastische Verhalten und die gummiähnlichen Eigenschaften.

Wesentlich für die technische Verwendung ist die Compoundierung in einem Doppelschneckenextruder. Durch die hohe Variation der rezeptiven Zusammenstellung bieten diese thermoplastischen Elastomere ein sehr interessantes Leistungsspektrum.

Bei Verwendung der TPE im Thermoplast-Schaumspritzgießen ist die Schaumgüte auch direkt vom Material abhängig. Klassische Spritzgieß TPE-Typen zeigen nur unzureichende Schäumergebnisse.

Übliche TPE Spritzgießmaterialien besitzen nur eine geringe Schmelzfestigkeit. Bereits bei geringen Aufschäumgraden kann es zu einem Aufreißen der Zellwände kommen.

Auf den Schaumbildungsprozess wirkt sich sehr stark das Fließverhalten der Polymerschmelze unter Dehnbelastung aus. Durch die entwickelten Materialmodifikationen soll eine höhere Schmelzfestigkeit und -dehnfähigkeit erzielt werden. Dadurch sind homogener Zellstrukturen und größere Dichtereduzierungen machbar.

Weitere Bedeutung für die entstehende Schaumstruktur besitzen Nukleierungsmittel. Sie erhöhen die Nukleierungsdichte und die Nukleierungsrate der Gasblasen. [2]. Passive Nukleierungsmittel in den TPE Compounds können dazu dienen die Zellbildung zu verbessern. Um dem Klimawandel entgegenzuwirken und die verbindlichen Klimaziele der Politik zu erreichen, haben viele Unternehmen in den vergangenen Jahren ein Klimamanagement

implementiert und wollen ihre Emissionen in den nächsten Jahren drastisch reduzieren. Der CO₂-Fußabdruck wird also in naher Zukunft ein Parameter für die Vergabe neuer Projekte werden. Stand heute ist die ISO 14067 zur Berechnung des CO₂ Äquivalents ein Rahmenwerk und erlaubt im Detail verschiedene Rechnungswege

Der Produkt CO₂-Fußabdruck eines Standard 60 ShA TPS-Compounds beispielhaft nach der ISO 14067 berechnet. beträgt 2,83 kg CO₂e / kg TPE (cradle to gate) - der CO₂ Fußabdruck kann in verschiedene Komponenten aufgeteilt werden: 2,63 kg CO₂e / kg TPE für die Produktion des Rohmaterials, 0,09 kg CO₂e / kg TPE, die dem Transport des Rohmaterials zugerechnet werden und 0,11 kg CO₂e / kg TPE-S für den Compoundierprozess. In Kombination mit reduzierten Prozessaufwand sollen sich hier zukünftig Einsparungen bezüglich der Treibhausgasemissionen für Verkleidungsteile ermöglichen lassen.

Die Sandwichstruktur aus einem einzigen Material erlaubt einfache Recyclingansätze ohne Abwertung des Stoffgemisches. Der Vorteil der TPE ist in der Kombination mit PP als Verbundwerkstoff, dass man ein sortenreines System erhält. Eine Zugabe von Regranulat zu den TPE Materialien ist prinzipiell gut möglich.

Tabelle 1: Eigenschaften der TPE Compounds

Eigenschaften TPE Compound	Prüfvorschrift	Kennwert
Härte	DIN ISO 48-4	Ab 65 Shore A
Dichte	DIN EN ISO 1183-1	Ab 0,90 g/cm ³
Reißfestigkeit längs	DIN 53 504	> 5,0 MPa
Reißdehnung längs	DIN 53 504	> 330 %

Weiterhin müssen die TPE Compounds die Innenraumanforderungen im Automobil in Bezug auf Emission-, Brennverhalten und Sonnenlicht- und Wärmebeständigkeit erfüllen.

Tabelle 2: Eigenschaften der TPE Compounds für die Innenraumanwendung

Eigenschaften TPE Compound	Prüfvorschrift	Kennwert
Geruch	VDA 270, Variante 3	≤ 3,5 Note
Fogging	DIN 75201, Verfahren B	≤ 2 mg
Emission organischer Verbindungen	PV 3341	≤ 30 µg/C
Brennverhalten	DIN 75 200, Dicke 2 mm	< 100 mm/min
Xenontest	DIN EN ISO 105-B06, Bedingung 3, 3 Zyklen	Graumaßstab > 4
Wärmebeständigkeit	100 °C / 48 h	Keine optische Veränderung

Die TPE Materialien weisen eine hervorragende Verbundfestigkeit mit PP auf.

Großer Vorteil der TPE Compounds ist die Variabilität hinsichtlich stoffschlüssigem Haftverbund zu weiteren Thermoplasten wie z.B. ABS.

4. Versuche und Einflussgrößen

Die Ausgangssituation zum Start der Versuche war, dass mittels Hochdruck-TSG weiche Schaumstrukturen aus TPE herstellbar waren, denen es aber an Homogenität über den kompletten Fließweg und an fehlerfreier Oberfläche mangelte.

Das Ziel des Projektes war, Prozess- und Materialkonfiguration soweit zu optimieren, dass die gewünschten Eigenschaften gleichzeitig in Kombination erreicht werden und Ansatzpunkte zu finden, künftig mittels Prozesssimulation die zu erwartende Bauteilqualität einschätzen zu können.

In den durchgeführten Untersuchungen wurden zunächst die prozess- und materialseitigen Einflussgrößen auf die Bauteilqualität in einem Ein-Komponenten-Prozess analysiert. Für diese Versuche wurde ein speziell für TSG Anwendungen konzipiertes Versuchswerkzeug der Fa. ARBURG genutzt. Dieses Werkzeug wurde für ARBURG von GK Concept entwickelt, von PMT Technology GmbH (heute zur FRIMO gehörend) gebaut und von FRIMO GmbH für die Versuche nochmals mit speziellen Einsätzen bestückt.

Das Formteil ist in Bild 3 dargestellt. Die Anspritzung wurde über einen Film realisiert, die Fließweglänge beträgt ca. 450mm. Für die Untersuchungen wurde eine Startwandstärke von 2,3mm gewählt. Die Endwandstärke ergab sich aus der Startwandstärke plus dem jeweiligen Öffnungshub. Die Abdichtung der Kavität während des Öffnungshubes (Expansion) erfolgte über eine gefederte Rahmenplatte. Die Öffnungsbewegung des Werkzeuges und somit die Expansion der Kavität muss bei diesem Werkzeugkonzept über die Maschinenbewegung erfolgen. Dafür bestehen hohe Anforderungen an die Präzision der Werkzeugposition. Aus diesem Grund wurden die Versuche auf einer Maschine mit elektrischer Schließeinheit durchgeführt.

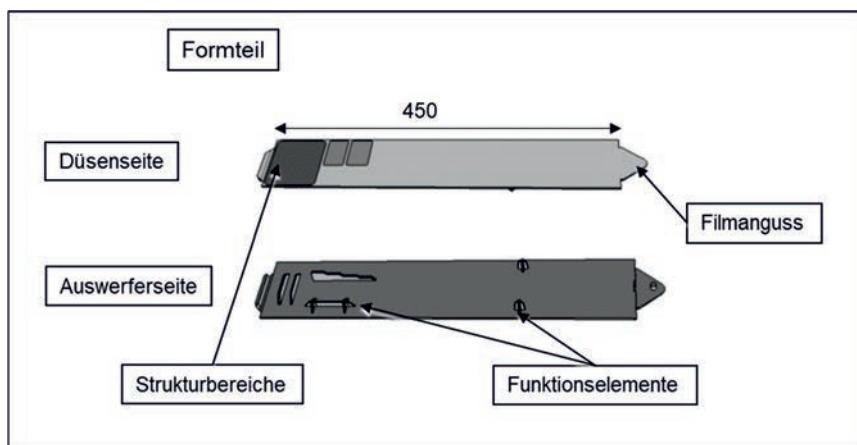


Bild 3: Arburg Bauteil TSG Versuchswerkzeug

Der Fokus der Untersuchungen lag auf der Herstellung homogener Schaumstrukturen (Haptik) und guter Oberflächen (Optik). Dabei wurde der Einfluss folgender Parameter untersucht:

- Prozess:
 - Einspritzgeschwindigkeit, Verarbeitungstemperatur, Werkzeugtemperatur, Nachdruckhöhe, Nachdruckdauer, Expansionsverhältnis (Öffnungshub), Expansionsgeschwindigkeit (Öffnungsgeschwindigkeit)
- Treibmittel:
 - Treibmittelkategorie: chemisch / physikalisch, Typ, Treibmittel-Anteil
- Material:
 - Grundhärte, Füllstoffanteil, Molekularer Aufbau
- Bauteil / WZG – Geometrie
 - Fließweglänge, Strukturierung (Narbung), Wanddicken

Aufgrund der Vielzahl an Parametern und der komplexen Zusammenhänge zwischen diesen wird der Einfluss auf die Bauteilqualität im folgenden Abschnitt anhand konkreter Fehlerbilder und Strategien für deren Vermeidung beschrieben. Die in Bild 4 dargestellten Fehlerbilder, haben sich im Verlauf der Untersuchungen als charakteristisch abgezeichnet.

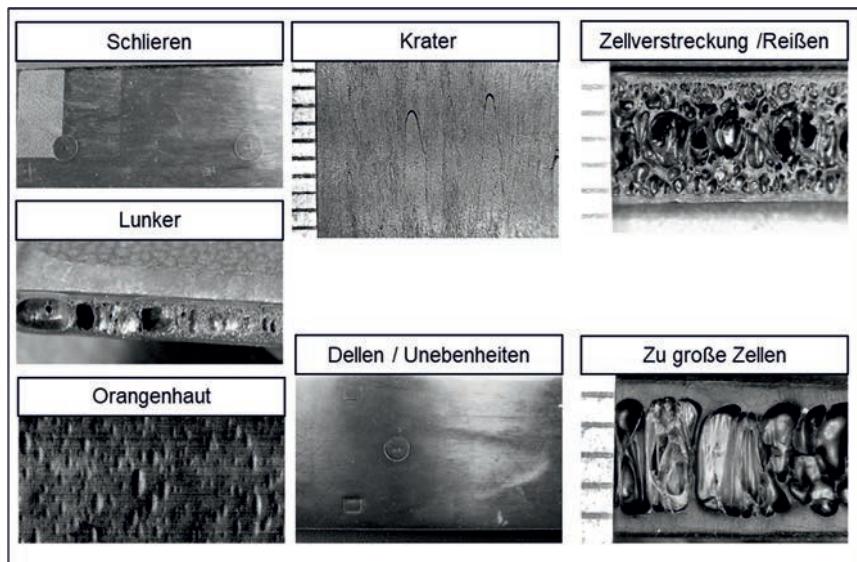


Bild 4: Fehlerbilder beim Schaum-Spritzgießen von TPE

Schlieren / Krater

Schlieren & Krater an der Bauteiloberfläche resultieren aus den Mechanismen der Schaumstrukturbildung während des Füllvorganges. Der Druckabfall an der Schmelzefront führt dort zur Nukleierung und zum Wachstum von Zellen, welche durch die Quellströmung an die Werkzeugwand gefördert werden und durch die vorbeifließende Schmelze verstreckt werden. Zum Teil reißen die Blasen sofort an der Kavitätswand auf und sind als Schlieren sichtbar. Die Zellen, die erst nach dem Erstarren durch die Scherbelastung deformiert werden, zeichnen sich in Form von Kratern ab. Als mögliche Strategien zur Reduzierung oder Vermeidung haben sich in den Untersuchungen folgende gezeigt:

- Einspritzgeschwindigkeit erhöhen
- Verarbeitungstemperatur verringern
- Werkzeugtemperatur erhöhen

- Treibmittelanteil reduzieren
- Chemisches Treibmittel nutzen
- Molekularer Aufbau: Schmelzfestigkeit erhöhen, Dehnverfestigung erhöhen
- Fließweglänge reduzieren
- Sichtflächen strukturieren
- Thermische Trennschichten → Beschichtung in der Kavität:

Orangenhaut

Bei den Versuchen aufgetretene kleinere Unebenheiten in Form von Vertiefungen auf der gesamten Bauteiloberfläche wurden als Orangen Haut bezeichnet. Diese Vertiefungen können infolge einer Kombination aus zu geringer Randschichtstabilität, zu grober Zellstruktur und zu geringem Gasdruck entstehen.

Parameter, welche die Stabilität der Randschicht steigern und die Zellgröße der Schaumstruktur verringern, können zur Optimierung dieses Fehlerbildes genutzt werden. Die Parameter zur Beeinflussung der Zellgrößen wird in einem späteren Abschnitt beschrieben und im Folgenden nur die Parameter für die Stabilisierung der Randschicht:

- Verarbeitungs- und Werkzeugtemperatur verringern
- Nachdruckzeit erhöhen
- Grundhärte Material erhöhen
- Füllstoffanteil erhöhen

Dellen / Unebenheiten

Im Gegensatz zur Orangen Haut handelt es sich bei diesem Fehlerbild eher um großflächige Inhomogenitäten, in Form von Vertiefungen, auf der Bauteiloberfläche. Die Ursache dafür ist die zu geringe Expansion in diesen Bereichen. Möglichkeiten zur Vermeidung sind:

- Nachdruckzeit verringern
- Treibmittelanteil erhöhen
- Physikalisches Treibmittel Stickstoff nutzen

Lunker

Als Lunker konnten größere zusammenhängende Blasen in einer sonst feinen Schaumstruktur beobachtet werden. Dieses Fehlerbild trat zunehmend zum Fließwegende hin auf. Die Ursache wird in der bereits im Einspritzvorgang einsetzenden Nukleierung und dem Wachstum von Zellen vermutet, welche durch den Nachdruck nicht hinreichend komprimiert und wieder in Lösung gebracht werden können [3]. Die Strategien zur Reduzierung der Lunkerbildung im Füllvorgang entsprechen weitestgehend denen zur Reduzierung der Schlieren. Weitere Ansätze zur Reduzierung der Lunker:

- Nachdruck erhöhen
- Nachdruckzeit erhöhen [3]

Zellverstreckung & Reißen

Während der Expansion der Kavität und der damit eingeleiteten Nukleierung und dem Zellwachstum wird die expandierbare Schmelze im Kern einer mehrachsigem Dehnbeanspruchung ausgesetzt. Wird bei diesen Beanspruchungen die vorliegende Schmelzefestigkeit, welche unter anderem von der im Kern vorliegenden Temperatur abhängig ist, überschritten, kommt es zum Reißen der Zellwände. Zu stark verstreckte oder gerissene Zellen haben einen negativen Einfluss auf die Haptik der Oberfläche insofern, dass sie das Rückstellverhalten der Schaumstruktur verringern. Ebenso kann es in den Bereichen der gerissenen Zellstrukturen zu Beulen in der Oberfläche kommen, da durch den Gasdruck die weiche TPE Randschicht nach Außen gedrückt wird. Strategien zur Verringerung oder zum Vermeiden dieses Fehlerbildes sind:

- Nachdruckzeit erhöhen
- Expansionsverhältnis (Öffnungshub) verringern
- Expansionsgeschwindigkeit (Öffnungsgeschwindigkeit) verringern
- Molekularer Aufbau: Schmelzedehnbarkeit und -festigkeit erhöhen
- Fließweglänge reduzieren

Zu große Zellen

Um eine angenehme Haptik der TPE Oberfläche zu erreichen, war das Ziel der Versuche möglichst feinzellige Schaumstrukturen herzustellen. Dies konnte unter anderem mit folgenden Parametern erreicht werden:

- Nachdruck erhöhen
- Nachdruckzeit erhöhen
- Expansionsgeschwindigkeit (Öffnungsgeschwindigkeit) erhöhen
- Treibmittelanteil erhöhen
- Treibmitteltyp Stickstoff nutzen
- Füllstoffanteil erhöhen
- Molekularer Aufbau: Schmelzedehnbarkeit und -festigkeit erhöhen

Zusammenfassung der Einflüsse auf Haptik und Optik:

Um eine angenehme Haptik zu erreichen war eine Dichte von maximal 50% der Kompakt-Dichte angestrebt. Was bei einer Startwandstärke von 2,3mm einen Öffnungshub von min. 2,3mm erfordert. Die kompakte Randschichtdicke betrug je nach verwendeter TPE-Type 0,4 – 0,7mm. Somit lag die Dicke des expandierbaren schmelzflüssigen Kerns im Bereich von 1,5 - 0,9mm. Die maximal möglichen Öffnungshübe (ohne Reißen der Zellen) betrugen bis ca. 10mm, womit sich eine Dichtereduktion um bis zu 80% der Kompakt-Dichte ergibt.

Die Haptik der TPE Oberfläche kann neben der Materialgrundhärte über den Öffnungshub maßgeblich beeinflusst werden. Die Eindruckkräfte bei verschiedenen Öffnungshüben sind in Bild 5 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass bei den Proben mit größerem Öffnungshub eine größere Verformung der Probe bei gleicher Kraft möglich ist.

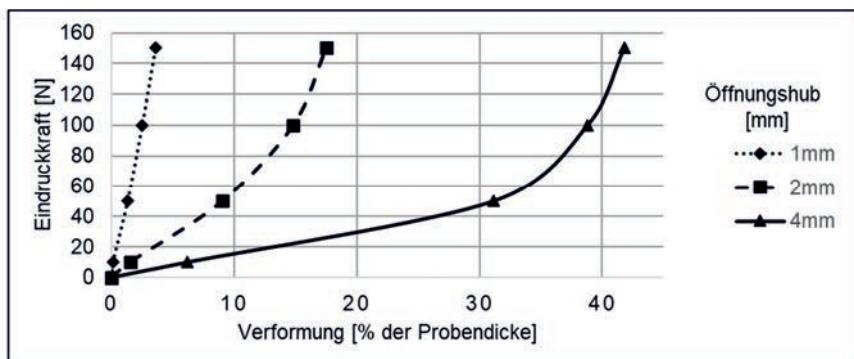


Bild 5: Druckversuche bei Proben mit verschiedenen Öffnungshüben

Im Projekt wurden umfassende Untersuchungen für verschiedene Materialvarianten durchgeführt, bei denen die in Kapitel 4 aufgeführten Einflussgrößen systematisch variiert und analysiert wurden. Dabei konnten als Ergebnis Musterteile gefertigt werden, die einen homogenen weichen Schaum über die gesamte Fließweglänge und eine schlierenfreie Oberfläche aufwiesen.

In Bild 6 sind Bilder von Oberfläche und Schaumstruktur dargestellt.

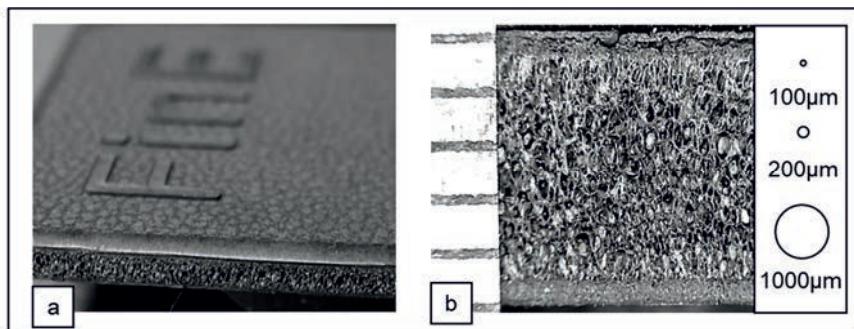


Bild 6 : a: schlierenfreie Oberfläche; b: homogener Schaum - bei 3mm Öffnungshub

5. Simulative Vorausplanung und Begleitung der Versuche

Im Vorfeld und versuchsbegleitend wurden rheologische Simulationen durchgeführt, um einerseits qualitative Vorhersagen zum Einfluss der Prozessparameter auf die Schaumstruktur-Bildung treffen zu können und andererseits diese anhand der realen Versuchsergebnisse zu validieren. Die Berechnungen wurden mit CADMOULD durchgeführt, die benötigten Materialdaten wurden von Allod zur Verfügung gestellt.

Aus der rheologischen Simulation wurden im Vorfeld der Versuche die Einflussparameter auf die Schaumstrukturbildung untersucht. Als Ausgabewert aus der Simulation kann dazu unter anderem der Blasenradius im Inneren genutzt werden. Dieser steigt aufgrund des Druckabfalls an der Schmelzefront an und kann durch die Prozessparameter beeinflusst werden. Eine Reduktion des Blasenradius kann beispielsweise durch eine Erhöhung der Einspritzgeschwindigkeit oder durch ein Absenken der Schmelztemperatur erzielt werden. Die Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse dieser Variation sind in Bild 7 dargestellt. Diese Tendenzen der Simulationsergebnisse korrelieren mit den Beobachtungen während der realen Versuche.

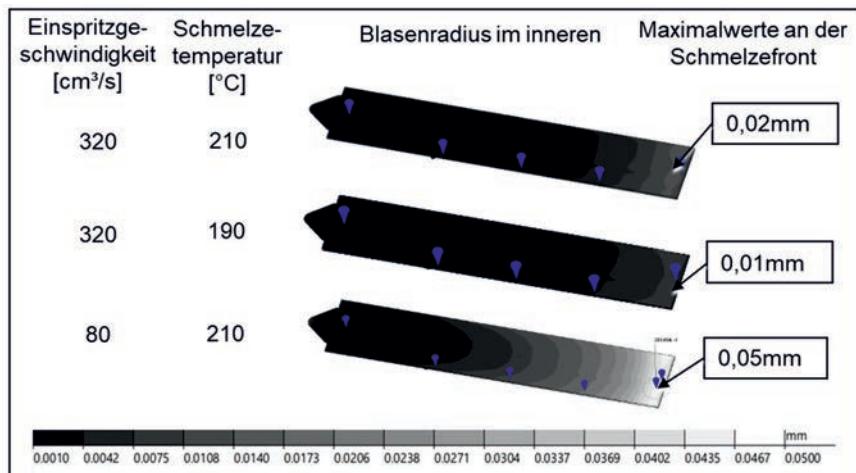


Bild 7: Blasengröße an der Schmelzefront als Indiz für Schlierenbildung

Des Weiteren kann die Simulation genutzt werden, um die Randschichtdickenentwicklung über die Nachdruckzeit zu erfassen und den optimalen Zeitpunkt für den Öffnungshub zu definieren. Dieser ergibt sich je nach Materialeigenschaften und der Mindestrandschichtdicke. In Bild 8 ist

beispielhaft die Temperaturverteilung über den Bauteilquerschnitt zu verschiedenen Zeitpunkten dargestellt. Unter der Annahme, dass eine Randschicht von 0,6mm erforderlich ist, ergibt sich der Zeitpunkt für die Expansion der Kavität bei ca. 6,5s (nach Start Einspritzen).

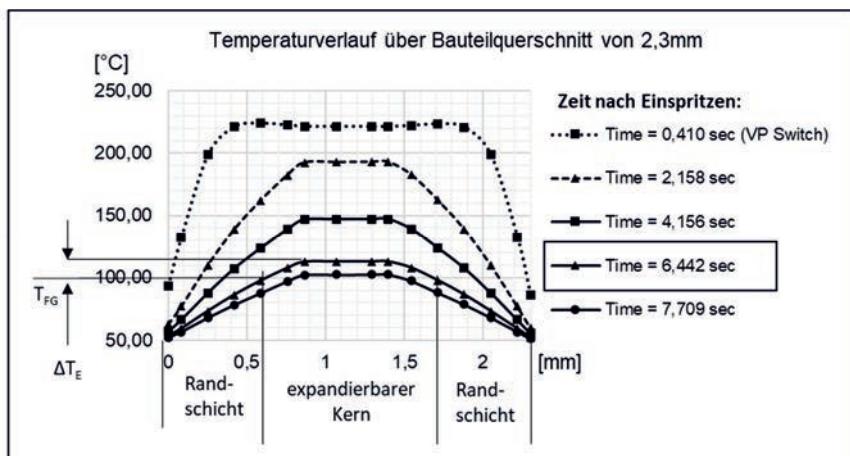


Bild 8: Zeitliche Entwicklung der Randschichtdicke; T_{FG} : Fließgrenztemperatur, ΔT_E : Expansions-Temperaturfenster

Kann dieser Zeitpunkt simulativ erfasst werden, so lassen sich mit den Simulationsergebnissen Aussagen über die Homogenität der Temperatur- und Druckverteilung zum Zeitpunkt des Öffnungshubes schließen. So ist in Bild 8 zu erkennen, dass sich für diesen Zeitpunkt an dieser Position im Bauteilinneren ein Temperaturdelta für die Expansion (ΔT_E) ergibt. Ob sich bei diesem Temperaturfenster eine homogene Schaumstruktur ohne Reißen der Zellen ausbilden kann, wird durch die Materialcharakteristik (Schmelzefestigkeit, dehnviskose Eigenschaften) und die Beanspruchung durch den Öffnungshub bestimmt.

In Bild 9 ist die Gegenüberstellung der berechneten Temperaturverteilung zum Zeitpunkt des Öffnungshubes dargestellt sowie ein reales Bauteil mit deutlich sichtbaren Bereichen, in denen aufgerissenen Zellstrukturen vorhanden sind.

Ist für das Material ΔT_E in Form der Einfriertemperatur $T_{EMin}=T_{FG}$ als untere Grenze und die obere Grenze T_{EMax} (Zellen reißen nicht) für einen definierten Öffnungshub bekannt, können die Bereiche von Inhomogenitäten aus der Simulation abgeleitet werden. Für die Bereiche

unterhalb der Einfriertemperatur ist keine Expansion des Kernes mehr zu erwarten. Als Obergrenze wurde für dieses Beispiel bei einem Öffnungshub von 3mm eine Temperatur von 130°C definiert. In den Bereichen, in denen diese Temperatur überschritten wird, kommt es zum Reißen der Zellstruktur.

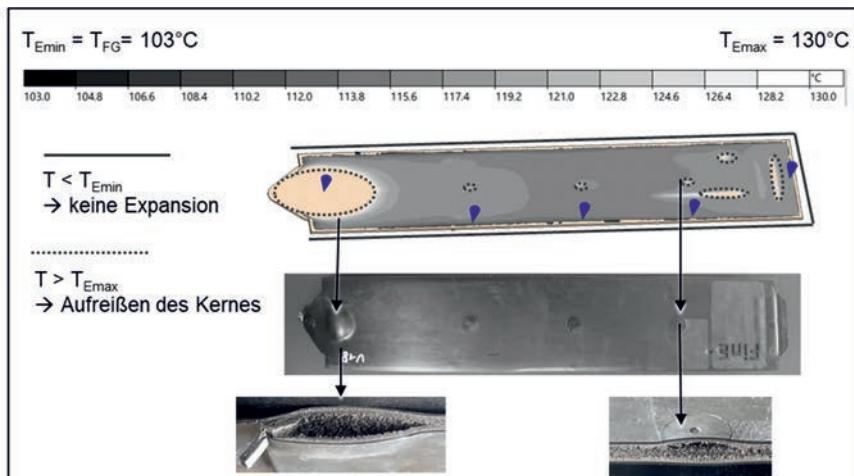


Bild 9: Temperaturverteilung beim Öffnungshub: Gegenüberstellung Simulation - Realbauteil

6. Ausblick und mögliche Anwendungen

Mit dem im Projekt verwendeten Hochdruck-Thermoplast-Schaumspritzgiessen können die Prozessschritte bei der Herstellung geschäumter Sichtbauteile mit angenehmer Haptik im Automobilinterieur reduziert werden. Zusätzlich sind hier in der Schaumkomponente, im Vergleich zu Kompaktmaterial, Gewichtseinsparungen von bis zu 80% erreichbar, was im Hinblick auf aktuelle Umweltdiskussionen einen deutlichen Vorteil bietet. Denn bereits 100 kg Gewichtsreduzierung verringern den CO₂-Ausstoß um ca. 10 Gramm pro gefahrenem Kilometer [4]. Zusätzlich zur Gewichtsreduktion kann durch die richtige Auswahl des Materialsystems (z.B. PP/TPE) das Bauteil am Ende der Lebenszeit als sortenreines System dem Kreislauf wieder zugeführt werden. Die weiche angenehme Oberfläche und die optimale Eignung zur Verarbeitung im 2k-Spritzguss bringen Interieur-Bauteile wie Türbrüstungen, Arm- oder Knieauflagen in den Fokus.

Die umfangreiche Basisarbeit im Projekt hat gezeigt, dass weiche Sichtoberflächen mit TPE realisierbar sind. Dabei wurde deutlich, dass die Balance zwischen Haptik und Optik eine genaue Kenntnis des Materialsystems und einen perfekt auf das Bauteil abgestimmten Prozess erfordert. Auf Basis der Simulations-Ergebnisse wird zukünftig eine Prognose der zu erwartenden Schaumqualität anhand von Prozesssimulationen möglich. Für einen potentiellen Serieneinsatz sind allerdings noch weitere Prüfungen, wie z.B. zur Abrieb-, Kratz- und Cremebeständigkeit sowie des Reinigungsverhaltens nötig. Weitere Potentiale sieht man auch in der Dämpfung von Vibrationen sowie in der erhöhten thermischen Isolation durch den Schaum.

7. Literaturverzeichnis

- [1] A. M. Volker Altstädt, Thermoplast-Schaumspritzgießen, München: Carl Hanser Verlag, 2010.
- [2] J. Stange, Einfluss rheologischer Eigenschaften auf das Schäumverhalten, Erlangen, 2006.
- [3] M. Tromm, Controlling cellular structure in thermoplastic foam injection molding, Kassel: Uni Kassel, 2020.
- [4] PlasticsEurope AISBL, Automotive. The world moves with plastics, Brussels, 2018.

Sorting technologies: the key to quality products in a circular economy

Dr.-Ing. Harald Lehmann, TOMRA Sorting GmbH, Mülheim-Kärlich

Abstract

Sorting nowadays is much more than simply separating types of plastic, e.g. separating PE and PP. If one takes a holistic approach when considering the circular economy, it becomes clear that sorting is a key, but it is embedded in an overall process that is much more complex.

The circular economy has not only ecological but also economic and strategic aspects, which are derived, for example, from the increase in alternative powertrains and which, in the medium term, must lead to a new way of thinking amongst all economic stakeholders.

A modern recycling process involves more steps than sorting alone; the individual process steps are presented and an outlook on future potential is given. The pricing of high-quality recyclates is also discussed.

1. Introduction

Plastics are found everywhere in the modern world and contribute significantly to the prosperity of our society. Still not satisfactorily resolved is the issue of high-quality plastic recycling; the only exception today is PET bottles, which can be returned to circulation via take-back systems. Since most polymers can only be mixed together to a very limited extent or not at all, sorting plays a key role here.

Sorting today is much more than just the simple separation of types of plastic, such as separating PE and PP.

Modern sorting technology – together with other process steps – is technically capable of delivering qualities that meet the requirements of a circular economy ...and development is far from over.

Setting up a circular economy requires a rethink in almost all areas – from design to materials, the production of a product, its entire service life and up to the end of its utilization phase. Previous linear models, which are deeply rooted in our thinking, no longer work here.

In a world that is currently undergoing massive change, a rethink is however urgently needed – not only for ecological reasons, but also for economic and strategic reasons.

To this end, industries must also break away from previously valid paradigms, for example, in terms of perceptions, but also specifications, standardization – and pricing.

2. Why a circular economy?

Strategic importance [1]

The world around us is undergoing a huge upheaval – electromobility has a more far-reaching share in this than one would think off the bat. The development of alternative drive systems means that oil-producing countries – led by the United States, Saudi Arabia (OPEC) and Russia – are increasingly planning and building large new plants that can produce between 30% and 40% petrochemical products and fewer fuels than today, when the current figure is 8% - 10% In these regions, the raw materials for polymers are correspondingly produced. Europe, with its low production of around two million barrels per day, plays a subordinate role here, and for reasons of economic efficiency, Europe is even reducing capacity.

Or, to put it another way, European companies are becoming increasingly dependent on the importation of petrochemical products. At the same time, it can be assumed that plastics production worldwide will increase significantly. With a circular economy, Europe can reduce these dependencies.

Economic importance [2]

"Waste is profit" is just a statement about the subject which has a very true core. In addition, however, it also a matter of questions of resource and energy efficiency, with which, for example, operating costs are saved.

Strictly speaking, plastic articles that are not run in the cycle indicate a failure in the value chain, as this has not been thought through to the end: we are 'disposing' of a material that still has a value. Loosely paraphrased: we are throwing money out the window.

Ecological importance

People need and produce plastics, and globally speaking, polymers will become even more important by the middle of the century than they are today. Our environment, on the other

hand, has no need of them. For some years now, we have been seeing more and more images of the pollution of the oceans by plastic articles and images of animals dying from them.

This reflects the dilemma we face today: we need plastics, but not in the environment. The plastics floating around in the world's oceans are lost to the circular economy because they cannot be sent to further processing and utilization. Today, unfortunately, only a very small part actually runs in the closed circuit; see Fig. 1.

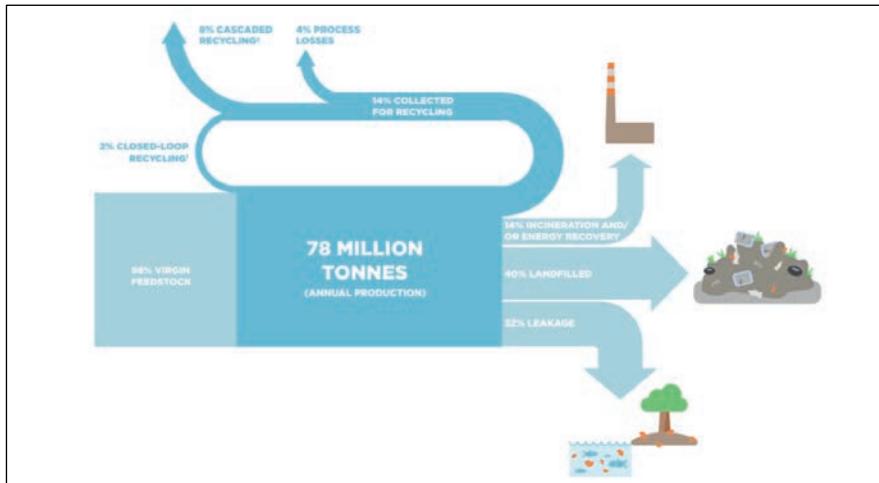


Fig. 1: Material flows [3]

This small proportion of just 2%, which deserves to be called a 'circulation', consists of PET bottles that are linked to a deposit system, so that they have a **value** (!) and are actually brought back. This system is known to every consumer in Germany, but in other countries technologies of this kind are in some cases completely foreign.

An efficient circular economy must therefore start well before the sorting stage: in other words, at the *collection* of plastics. Only articles that are 'in the loop' will be retained and not end up in the environment, but instead be even available for a recycling process. Material that is floating around in the world's oceans is lost to a circular economy and therefore worthless.

Collection systems have also evolved over the years; see Fig. 2. In addition, of course, collection requires an efficient infrastructure, which is also not (as yet) available in many countries. However, this is not the subject of consideration here.



Fig. 2: The first deposit machine, the Tomra 1A (left) from 1972 (with photocells and halogen lamps), and the latest development (right), the Tomra R1 from 2020.

3. The modern recycling process for plastics

Collected plastic is available for further processing and no longer represents environmental pollution. In a recycling plant this reprocessing begins with a sorting stage.



Fig. 3. View of a sorting plant (2019, left) and a detection unit in orange (right).

Fig. 3 shows a view of a modern sorting plant. The incoming plastic, often in the form of bales, is first loosened and sent off on a belt system, which transports the material at about 2 m/s. Sorting devices then separate the material flow into individual fractions. The most

common and well-known technology for this is near-infrared (NIR); however, possibilities have increased significantly over the years. Today, various sensor systems are available that can be combined with each other as desired; see Table 1.

Table 1: Sensor technologies available to modern sorting systems

Near-infrared spectroscopy (NIR)	Use of specific spectral properties (reflection) of polymers
LED spectroscopy (LED)	Use of color and spectral properties at very high resolution
Spectroscopy in the visible range (VIS)	Use of specific spectral properties (reflection) of polymers in the visible wavelength range
X-ray transmission (XRT)	Determination of atomic density regardless of surface condition and sample thickness
Infrared transmission (IRT)	Density determination and shape analysis by light absorption
Emission spectroscopy (LIBS 'laser-induced breakdown spectroscopy')	Elemental composition in metals
IR cameras	Use of material-specific thermal conductivity and heat dissipation
Laser reflection / fluorescence	Structural and elemental analysis by reflection, absorption and fluorescence of laser light
Color cameras	High-resolution color detection
Electromagnetic sensors	Use of electromagnetic properties

The actual detection takes place in the range of a few milliseconds. At the end of the conveyor belt, depending on the detected position of the object, the belt speed and the time, compressed air is emitted via a nozzle strip. Objects are 'shot out' in this way and separated from the rest of the product stream, resulting in separate material flows, which are further treated individually (Figs. 4 and 5).

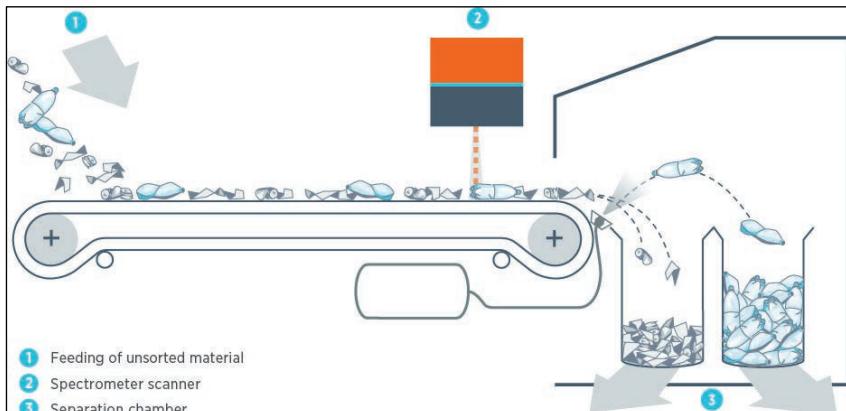


Fig. 4: Schematic representation of the entire sorting process

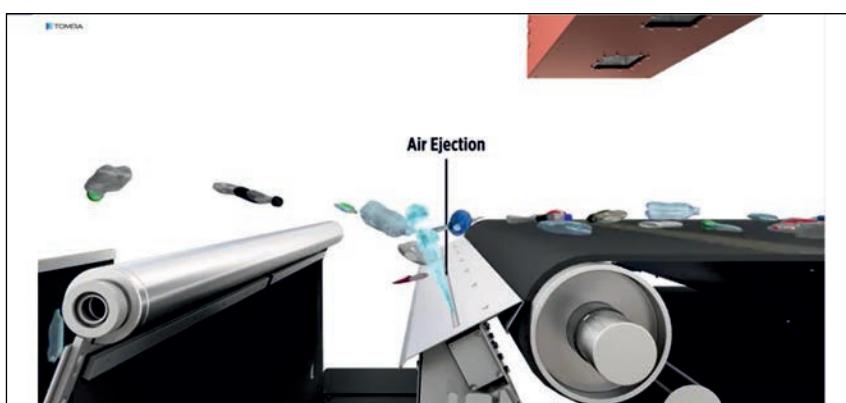


Fig. 5: Detail of the sorting process (separation of specific elements by compressed air)

The material flows separated in this way are already attaining a purity of up to 90%, sometimes even more, but this is not yet enough for a high-quality recycling. This is due not only to the proportion of foreign polymers that are still present but also to remnants, for example, of adhesives, labels, printing inks or biological residues. Attempting to process a material in this state into a new product cannot result in the kind of quality that is required for demanding products. Further processing steps are therefore required.

For further treatment to make sense, the material must be shredded to flakes in the next step. The material thus comminuted is first washed; and here a variety of experiments have shown that an effective washing requires passage through several steps preferably in counterflow:

1. Cold wash

The cold wash, since the water is conducted in counterflow, nevertheless has a temperature of about 40 °C. This step is used for removing coarse, wash-outable contaminants, such as biological residues

2. Hot wash

The hot wash contains a 2-3% sodium hydroxide solution at a temperature of around 80 °C. This step removes remnants of labels, adhesives, printing inks and the like. The dwell time is about 15 minutes.

3. Flushing

To ensure that no NaOH residues remain on the plastic, a flushing process then follows with fresh hot water, preferably also at 80 °C.

4. Drying

The flakes thus cleaned are then dried.

In relation to the infeed stream, a mass loss of 20% due to this process can be detected; the magnitude of this loss depends crucially on the quality of the input material.

Fig. 6 gives an impression of the dimensions of such a washing installation. It should be noted at this point that the treatment of the water is investment-intensive and can make up as much as one third of the total investment costs.



Fig. 6: Washing installation (manufacturer: Krones AG) at Zimmermann Recycling & Transporte GmbH, Lahnstein

In the installation shown in Fig. 6 a so-called flake sorting unit was installed, which removes remaining foreign materials and colors in one operation and increases the purity of the product to above 99%

The flake sorting unit works in parallel with several sensors in order to detect both materials and colors simultaneously. The cleaned and dried flakes are introduced into the system via a funnel and transported by gravity. Foreign particles are detected and ejected during free fall.



Fig. 7: Flake sorting unit

In summary, up to this point the material has been sorted, shredded, washed, dried, sorted once again and is now available in the form of cleaned flakes. A 'before and after comparison' is shown in Fig. 8.



Fig. 8: Bales of mixed, contaminated waste (left) were divided into individual fractions and processed into mono-material flakes (right) - here taking the example of PET.

These flakes can be compounded in a further operation and, if necessary, heat-treated again in order to remove any remaining contaminations that could lead to an odor problem.

By means of the method described, it has been possible, for example, to sort out a polyolefin from mixed household waste and to prepare it in such a way that with regard to its odor properties it is particularly suitable for interior applications in vehicles.

4. High-quality recyclates have their price - and rightly so!

The process of collection and processing described above is naturally bound up with both technical and financial expenditure, which increases with the demands placed on a product.

In principle, a price of '**virgin material plus x**' can be assumed here, which is already accepted in some industries.

European processors are increasingly dependent on plastics imports. Events such as hurricanes, trade wars, military conflicts, attacks, earthquakes and the like can lead to an interruption in the flow of material, which cannot be influenced from Europe, but whose consequences can be serious.

This higher price can therefore be justified not solely from the point of view of the effort involved. In the automotive industry, for example, supply contracts are concluded between processors and raw material manufacturers, in which the price per ton is higher than when a processor seeks material on the spot market. This extra charge in effect represents the insurance for delivery security over a long period of time.

The higher price of recyclates can be similarly justified – this extra charge too is like an insurance premium, in this case against the lack of raw materials in Europe and a contribution to the economic independence of companies from imports.

5. Outlook

The plastics markets are on the move as never before in the short history of polymers. And this movement has only just begun.

Of course, neither is the recycling industry standing still in its development, but is very innovative on the way to promoting the quality of the recyclates as such, but also quality management, quality assurance and standardization. Here the industry is going through a remarkable learning curve at a remarkable pace.

Let only the possibilities of using artificial intelligence, digital watermarks (the 'holy grail', for example) and others be mentioned in this connection, since purely physical methods alone will at some point no longer be sufficient to provide the data and qualities required for a real circular economy required are.

In standardization, too, intensive work is being carried out at all levels (DIN, CEN/CENELEC, ISO) on norms and standards for a functioning circular economy. A large number of standardization orders are currently being addressed to the Plastics Technical Standards Committee alone. The author himself co-authored the DIN SPEC 91446 [4] and is a member of the advisory board of the DIN Technical Standards Committee for Plastics (FNK), in which topics of the circular economy are currently being discussed intensively.

The decisive factor, however, remains: the medium-term plastics strategies of all players should include recycling as a means of ensuring independence from resources!

6. References

Unless otherwise noted, images and diagrams are taken from freely accessible documents from Tomra Sorting GmbH or have been created by the author himself.

- [1] Stricker, D. The Future of Plastics: Waste Not, Want Not presentation at the KI Group Summit, 2019
- [2] Wright, S.J. (2019) Circular economy, the next big opportunity Published by Bluetrees GmbH, pp. 27-42
- [3] Ellen McArthur Foundation (2016) The new plastics economy: rethinking the future of plastics, p. 27
- [4] DIN SPEC 91446 Classification of plastic recyclates through data quality levels for use and (internet-based) trade
Published in draft status at the time of going to press
Beuth Verlag (2021)

Sortiertechnologien: Der Schlüssel für Qualitätsprodukte in der Kreislaufwirtschaft

Dr.-Ing. Harald Lehmann, TOMRA Sorting GmbH, Mülheim-Kärlich

Kurzfassung

Sortierung ist heute viel mehr als nur die Trennung von Kunststoffsorten, z.B. eine Trennung von PE und PP. Verfolgt man einen holistischen Ansatz bei der Betrachtung der Kreislaufwirtschaft, so zeigt sich dass die Sortierung eine Schlüsselstellung besitzt, aber eingebettet ist in einen Gesamtprozess, der wesentlich komplexer ist.

Die Kreislaufwirtschaft hat neben ökologischen auch ökonomische und strategische Aspekte, die sich auch aus der Zunahme alternativer Antriebe ableiten und mittelfristig zu einer neuen Denkweise aller Wirtschaftsbeteiligten führen muss.

Ein moderner Recyclingprozess umfasst mehr Schritte als eine reine Sortierung; die einzelnen Prozeßschritte werden dargelegt und ein Ausblick auf zukünftige Potenziale gegeben. Auch die Preisgestaltung von hochwertigen Recyclaten wird thematisiert.

1. Einführung

Kunststoffe sind in der modernen Welt omnipräsent und tragen in erheblichem Maß zum Wohlstand unserer Gesellschaft bei. Nach wie vor nicht zufriedenstellend gelöst ist das Thema des qualitativ hochwertigen Kunststoff-Recyclings; einzige Ausnahme sind heute PET Flaschen, die durch Rücknahmesysteme sortenrein dem Kreislauf zurückgeführt werden können. Da die meisten Polymere zueinander keine oder nur eine geringe Mischbarkeit aufweisen, kommt hier der Sortierung eine Schlüsselrolle zu.

Sortierung ist heute viel mehr als nur die simple Trennung von Kunststoffsorten, z.B. eine Trennung von PE und PP.

Die moderne Sortiertechnik ist – zusammen mit anderen Prozeßschritten – technisch in der Lage, Qualitäten zu erzeugen, die den Ansprüchen einer Kreislaufwirtschaft genügen. Und die Entwicklung ist noch lange nicht zu Ende.

Der Aufbau einer Kreislaufwirtschaft bedingt in nahezu allen Bereichen ein Umdenken – angefangen vom Design, über die Materialien, die Herstellung eines Produktes, seine

gesamte Lebensdauer bis hin zum Ende seiner Nutzungsphase. Die bisherigen, in unserem Denken tief verwurzelten linearen Modelle funktionieren hier nicht mehr. In einer sich gerade massiv verändernden Welt ist ein Umdenken allerdings dringend notwendig – nicht nur aus ökologischen, sondern auch aus ökonomischen und strategischen Gründen.

Dazu müssen sich Branchen auch von bisher geltenden Paradigmen lösen, z.B. was die Begriffsgebung, aber auch Spezifikationen, Normung - und die Preisgestaltung angeht.

2. Warum Circular Economy?

Strategische Bedeutung [1]

Die Welt um uns herum befindet sich in einem gewaltigen Umbruch – daran hat die Elektromobilität einen weiter reichenden Anteil als man auf Anhieb meinen möchte. Die Entwicklung alternativer Antriebe führt dazu, dass erdölproduzierende Länder – allen voran die Vereinigten Staaten, Saudi-Arabien (OPEC) und Russland – zunehmend große, neue Anlagen planen und bauen, die zwischen 30% und 40% petrochemische Produkte und weniger Kraftstoffe erzeugen können als heute, wo dieser Anteil bei 8% - 10% liegt. In diesen Regionen entstehen entsprechend die Grundstoffe für Polymere. Europa mit seinen geringen Vorkommen von rd. zwei Mio bbl pro Tag spielt hier eine untergeordnete Rolle, aus Gründen der Wirtschaftlichkeit baut Europa sogar noch Kapazitäten ab.

Oder, anders ausgedrückt: Europäische Unternehmen werden zunehmend abhängig vom Import petrochemischer Produkte. Gleichzeitig darf davon ausgegangen werden, dass die Kunststoffproduktion weltweit signifikant steigen wird. Europa kann mit einer Kreislaufwirtschaft diese Abhängigkeiten reduzieren.

Ökonomische Bedeutung [2]

“Waste is profit” ist nur eine Aussage zu dem Thema, die einen sehr wahren Kern hat. Darüber hinaus geht es aber auch um Fragen der Ressourcen- und Energieeffizienz, mit der z.B. Betriebskosten eingespart werden.

Kunststoffartikel, die nicht im Kreislauf gefahren werden, zeigen streng genommen ein Versagen der Wertschöpfungskette auf, da diese nicht zu Ende gedacht ist: Wir “entsorgen” einen Werkstoff, der immer noch einen Wert besitzt. Salopp umschrieben: Wir werfen Geld zum Fenster raus.

Ökologische Bedeutung

Die Menschen brauchen und produzieren Kunststoffe, und global werden die Polymere bis zur Mitte des Jahrhunderts noch mehr an Bedeutung gewinnen als das heute der Fall ist. Unsere Umwelt hingegen braucht sie nicht. Seit einigen Jahren finden sich in zunehmendem Maß Bilder von der Verschmutzung der Meere durch Kunststoffartikel und von Tieren, die daran verenden.

Das spiegelt das Dilemma, mit dem wir uns heute konfrontiert sehen: Wir brauchen Kunststoffe, aber nicht in der Umwelt: Kunststoffe, die in den Weltmeeren umherschwimmen, sind für die Kreislaufwirtschaft verloren, da sie keiner weiteren Aufbereitung und Anwendung zugeführt werden können. Heute wird leider nur ein ganz geringer Teil tatsächlich im geschlossenen Kreislauf gefahren, siehe Abb. 1.

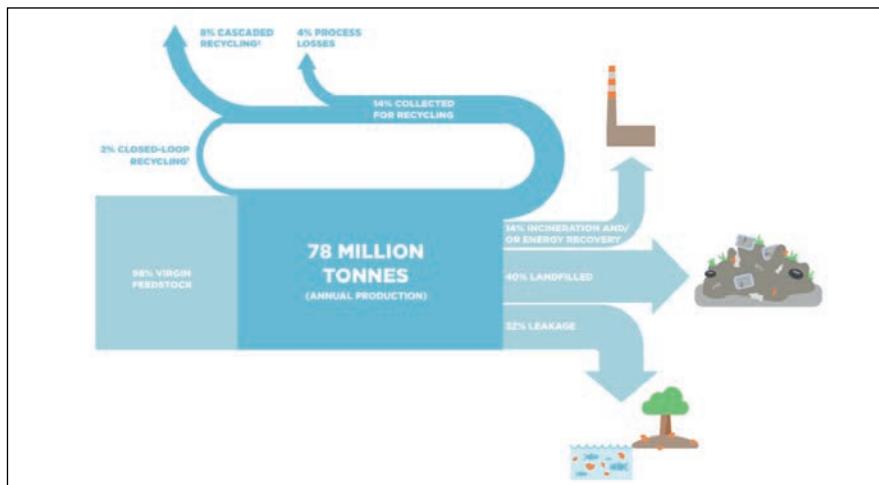


Bild 1: Darstellung der Stoffströme [3]

Bei diesem geringen Anteil von gerade einmal 2%, der die Bezeichnung "Kreislauf" verdient, handelt es sich um PET – Flaschen, die einem Pfandsystem angeschlossen sind, damit einen **Wert** (!) haben und auch tatsächlich zurückgebracht werden. Das System ist jedem Verbraucher in Deutschland bekannt, in anderen Ländern sind Technologien dieser Art zum Teil völlig fremd.

Eine effiziente Kreislaufwirtschaft muss folglich weit vor der Sortierung ansetzen: Bei der Sammlung von Kunststoffen. Nur Artikel, die sich im Kreislauf ("in the loop") befinden, bleiben erhalten und gelangen nicht in die Umwelt, sondern stehen überhaupt für einen Recyclingprozess erst zur Verfügung. Material, dass in den Weltmeeren umherschwimmt, ist für eine Kreislaufwirtschaft verloren und damit wertlos.

Auch die Sammelsysteme haben sich im Laufe der Jahre weiterentwickelt, siehe Abb. 2. Zusätzlich bedingt die Sammlung natürlich noch eine effiziente Infrastruktur, die in vielen Ländern ebenfalls (noch) nicht gegeben ist. Diese ist hier allerdings nicht Gegenstand der Betrachtungen.



Bild 2: Der erste Pfandautomat, der Tomra 1A (links) aus dem Jahr 1972 (mit Photozellen und Halogenlampen), und die neueste Entwicklung (rechts), der Tomra R1 aus dem Jahr 2020.

3. Der moderne Recyclingprozess für Kunststoffe

Gesammelter Kunststoff steht für eine weitere Aufarbeitung zur Verfügung und stellt keine Umweltbelastung mehr dar. Diese Aufarbeitung beginnt in einer Recyclinganlage mit einer Sortierung.



Bild 3: Blick in eine Sortieranlage (2019, links) und eine orangefarbene Detektionseinheit (rechts).

Das Bild 3 zeigt einen Blick in eine moderne Sortieranlage. Der ankommende Kunststoff, oft in Form von Ballen, wird zunächst gelockert und auf ein Bandsystem geschickt, welches mit etwa 2 m/s das Material transportiert. Die Sortiergeräte trennen den Stoffstrom in einzelne Fraktionen auf. Die hierfür gängigste und bekannteste Technologie ist das Nahinfrarot (NIR); die Möglichkeiten haben sich aber im Laufe der Zeit deutlich vergrößert. Heute stehen verschiedene Sensorsysteme zur Verfügung, die beliebig miteinander kombiniert werden können, siehe Tabelle 1:

Tabelle 1: Verfügbare Sensortechnologien für moderne Sortiersysteme

Nahinfrarot Spektroskopie (NIR)	Nutzung spezifischer Spektraleigenschaften (Reflektion) von Polymeren
LED Spektroskopie (LED)	Nutzung von Farb- und Spektraleigenschaften bei sehr hoher Auflösung
Spektroskopie im sichtbaren Bereich (VIS)	Nutzung spezifischer Spektraleigenschaften (Reflektion) von Polymeren im sichtbaren Wellenlängenbereich
Röntgen-Transmission (XRT)	Bestimmung der Atomdichte unabhängig von Oberflächenbeschaffenheit und Probendicke
Infrarot Transmission (IRT)	Dichtebestimmung und Gestaltanalyse durch Lichtabsorption
Emissions-Spektroskopie (LIBS "laser induced breakdown spectroscopy")	Elementzusammensetzung bei Metallen

IR Kameras	Nutzung der materialspezifischen Wärmeleitfähigkeit und Wärmedissipation
Laser Reflektion /Fluoreszenz	Struktur- und Elementanalyse durch Reflektion, Absorption und Fluoreszenz von Laserlicht
Farbkameras	Hoch auflösende Farberkennung
Elektromagnetische Sensoren	Nutzung elektromagnetischer Eigenschaften

Die eigentliche Erkennung erfolgt im Bereich weniger Millisekunden. Am Ende des Transportbandes wird, in Abhängigkeit von der erkannten Lage des Objektes, der Bandgeschwindigkeit und der Zeit Druckluft über eine Düsenleiste ausgestoßen. Objekte werden auf diese Art "herausgeschossen" und vom restlichen Produktstrom abgetrennt, so dass sich getrennte Stoffströme ergeben, die einzeln weiterbehandelt werden (Bild 4 & 5).

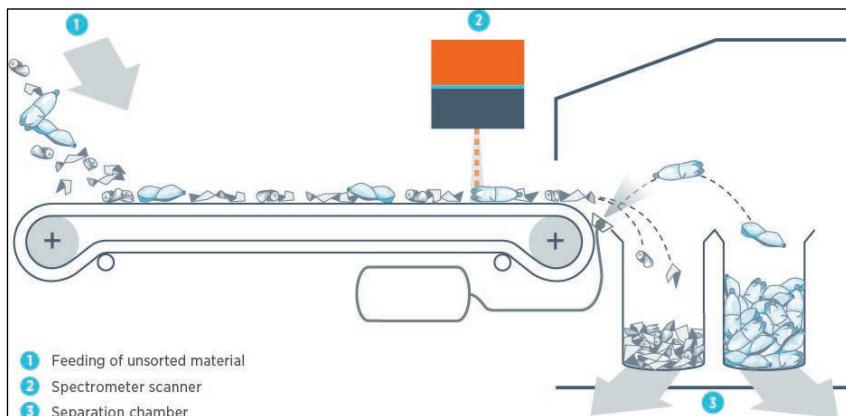


Bild 4: Schematische Darstellung des gesamten Sortievorgangs

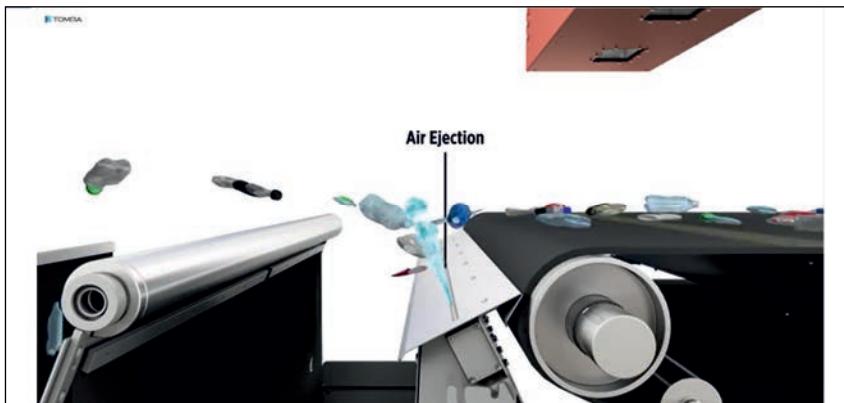


Bild 5: Detail des Sortiervorganges (Abtrennung spezifischer Elemente durch Druckluft)

Die auf diese Art getrennten Stoffströme erzielen durchaus bereits eine Reinheit von bis zu 90%, zum Teil auch darüber, was für ein qualitativ hochwertiges Recycling allerdings noch nicht ausreicht. Dies liegt an dem noch vorhandenen Anteil an Fremdpolymeren, aber auch an Resten z.B. von Klebern, Etiketten, Druckfarben oder biologischen Reststoffen. Ein Material in diesem Zustand zu einem neuen Produkt verarbeiten zu wollen kann nicht zu einer Qualität führen, die für anspruchsvolle Produkte erforderlich ist. Daher sind weitere Aufbereitungsschritte erforderlich.

Um eine weitere Behandlung sinnvoll zu ermöglichen muss das Material im nächsten Schritt zu Flakes geschreddert werden. Das so zerkleinerte Material wird zunächst gewaschen, wobei sich in einer Vielzahl von Versuchen gezeigt hat, dass eine effektive Wäsche mehrere Schritte bevorzugt im Gegenstrom durchlaufen muss:

1. Kaltwäsche

Die Kaltwäsche hat, da das Wasser im Gegentrom geführt wird, immer noch eine Temperatur von etwa 40°C. Dieser Schritt dient der Entfernung grober, abwaschbarer Verschmutzungen, z.B. biologischer Reststoffe

2. Heißwäsche

Die Heißwäsche enthält eine 2-3%ige Natriumhydroxidlösung bei einer Temperatur um die 80°C. Dieser Schritt entfernt Reste von Etiketten, Klebstoffen, Druckfarben u.ä. Die Verweilzeit liegt bei etwa 15 Minuten.

3. Spülvorgang

Um sicherzustellen dass keine NaOH-Reste am Kunststoff verbleiben, erfolgt abschließend ein Spülvorgang mit frischem, bevorzugt ebenfalls 80°C heißem Wasser.

4. Trockung

Die so gereinigten Flakes werden im Nachgang getrocknet.

Bezogen auf den Eingangsstrom kann durch diesen Prozess durchaus ein Masseverlust von 20% festzustellen sein; die Größenordnung dieses Verlustes hängt entscheidend von der Qualität des Eingangsmaterials ab.

Einen Eindruck von den Dimensionen einer solchen Waschanlage gibt Bild 6. Es sei an der Stelle darauf hingewiesen, dass die Aufbereitung des Wassers investitionsintensiv ist und bis zu 1/3 der gesamten Investitionskosten betragen kann.



Bild 6: Waschanlage (Hersteller: Krones AG) bei der Zimmermann Recycling & Transporte GmbH, Lahnstein

In der im Bild 6 gezeigten Anlage wurde eine sog. Flake-Sortierung installiert, welche restliche Fremdmaterialien und Farben in einem Arbeitsgang entfernt und die Reinheit des Produktes auf > 99% gesteigert kann.

Die Flakesortierung arbeitet parallel mit mehreren Sensoren, um sowohl Materialien als auch Farben simultan zu erkennen. Die gereinigten und getrockneten Flakes werden über einen Trichter in die Anlage eingebracht und mit der Schwerkraft transportiert. Während des freien Falls werden Fremdpunkte detektiert und ausgestoßen.



Bild 7: Flake-Sortierung

Zusammengefasst wurde bis hierhin das Material sortiert, zerkleinert, gewaschen, getrocknet, nochmals sortiert und liegt in Form von gereinigten Flakes vor. Einen "Vorher-Nachher-Vergleich" zeigt Bild 8.



Bild 8: Ballen aus gemischemtem, verschmutztem Abfall (links) wurde in einzelne Fraktionen aufgeteilt und bis zu sortenreinen Flakes (rechts) - hier am Beispiel PET - aufbereitet.

Diese Flakes können in einem weiteren Arbeitsgang compoundiert und bei Bedarf noch einmal wärmebehandelt werden, um noch vorhandene Komtaminationen, die zu einer Geruchsbeeinträchtigung führen könnten, zu entfernen.

Mittels des beschriebenen Verfahrens ist es beispielsweise gelungen, ein Polyolefin aus gemischemtem Hausmüll auszusortieren und so auszubereiten, das es vor allem im Hinblick auf seine Geruchseigenschaften im Fahrzeug für Innenraumanwendungen geeignet ist.

4. Hochwertige Recyclate haben ihren Preis – zurecht!

Der vorstehend beschriebene Prozess der Sammlung und Aufbereitung ist naturgemäß neben technischem auch mit finanziellem Aufwand verbunden, der mit den Anforderungen an ein Produkt steigt.

Hier ist grundsätzlich von einem Preis "**Neuware plus x**" auszugehen, was in einigen Branchen bereits akzeptiert ist.

Die europäischen Verarbeiter sind zunehmend von Kunststoff-Importen abhängig. Ereignisse wie z.B. Hurricanes, Handelskriege, militärische Auseinandersetzungen, Anschläge, Erdbeben u.ä. können zu einer Unterbrechung des Warenflusses führen, der von Europa aus nicht zu beeinflussen ist, dessen Konsequenzen jedoch gravierend sein können.

Dieser höhere Preis lässt sich daher nicht nur von der Seite des Aufwandes rechtfertigen. Auch in der Automobilindustrie werden z.B. zwischen Verarbeitern und Rohstoffherstellern Lieferverträge geschlossen, wo der Preis pro Tonne höher ist als wenn ein Verarbeiter auf dem Spot-Markt nach Material schaut. Dieser Aufschlag ist praktisch die Versicherung für die Liefersicherheit über einen langen Zeitraum.

Ähnlich kann man den höheren Preis für Recyclate begründen – auch dieser Aufschlag ist wie ein Versicherungsbeitrag, hier gegen den Mangel an Rohstoffen in Europa und ein Beitrag für die wirtschaftliche Unabhängigkeit der Unternehmen von Importen.

5. Ausblick

Die Kunststoffmärkte sind in Bewegung wie noch nie in der jungen Geschichte der Polymere. Und diese Bewegung hat erst begonnen.

Auch die Recyclingbranche bleibt in ihrer Entwicklung natürlich nicht stehen, sondern ist sehr innovativ unterwegs, um die Qualität der Recyclate als solche, aber auch das Qualitätsmanagement, die Qualitätssicherung und die Standardisierung voranzutreiben. Hier durchläuft die Branche gerade eine bemerkenswerte Lernkurve in beachtlichem Tempo.

Hierzu seien nur die Möglichkeiten des Einsatzes der Künstlichen Intelligenz, der Digitalen Wasserzeichen (z.B. "HolyGrail") und andere erwähnt, da die rein physikalischen Methoden allein irgendwann allein nicht mehr ausreichen werden um die Daten und Qualitäten zu liefern, die für eine echte Kreislaufwirtschaft erforderlich sind.

Auch in der Standardisierung wird intensiv auf allen Ebenen (DIN, CEN/CENELEC, ISO) an Normen und Standards für eine funktionierende Kreislaufwirtschaft gearbeitet. Allein an den Fachnormenausschuss Kunststoffe werden derzeit eine Vielzahl von Normungsaufträgen gerichtet. Der Autor selbst hat z.B. die DIN SPEC 91446 mitverfasst [4] und ist Mitglied des Beirates des DIN Fachnormenausschusses Kunststoffe (FNK), in dem Themen der Kreislaufwirtschaft derzeit intensiv diskutiert werden.

Entscheidend aber bleibt: Mittelfristige Kunststoffstrategien aller Akteure sollten das Recycling als Mittel zur Sicherung der Ressourcenabhängigkeit einbeziehen!

6. Literaturhinweise

Soweit nicht anders vermerkt, sind Bilder und Schemata frei zugänglichen Unterlagen der Tomra Sorting GmbH entnommen oder wurden vom Autor selber angefertigt.

- [1] Stricker, D. The Future of Plastics: Waste Not, Want Not
Vortrag auf der KI Group Summit, 2019
- [2] Wright, S.J. (2019) "Circular Economy, the next big opportunity"
Published by Bluetrees GmbH, S. 27-42
- [3] Ellen McArthur Foundation (2016) "The New Plastics Economy: Rethinking The Future Of Plastics", S. 27
- [4] DIN SPEC 91446 "Klassifizierung von Kunststoff-Rezyklaten durch Datenqualitätslevels für die Verwendung und den (internetbasierten) Handel"
Zum Zeitpunkt der Drucklegung veröffentlicht im Entwurfstatus
Beuth Verlag (2021)

Shaping the future of electromobility with holistic plastic solutions

Dr.-Ing. René Holschuh, Dr.-Ing. Thomas Bayerl,
BASF SE, Ludwigshafen

Abstract

The change in automotive culture is in full swing – cubic capacity and top speed as the sole considerations have long since ceased to suffice. Society demands sustainable, electromobile solutions. From the point of view of materials, this major and rapid change has brought with it many new opportunities and challenges at the same time. Even the legal regulations concerning safety requirements for electric vehicles are still under discussion. The few requirements regarding the safety of batteries usually relate to system considerations and thus leave developers a great deal of freedom. This paper discusses how plastics can position themselves in this environment and make a positive contribution.

1. Introduction

The age of electromobility has begun. By 2025 approximately 50% of all vehicles delivered in Europe will be equipped with electric drive components [1]. In addition to all-electric vehicles (BEV), this figure also includes the various gradations of hybrid vehicles (PHEV, FHEV and MHEV). Already today roughly every sixth vehicle is equipped with these new components (Fig. 1).

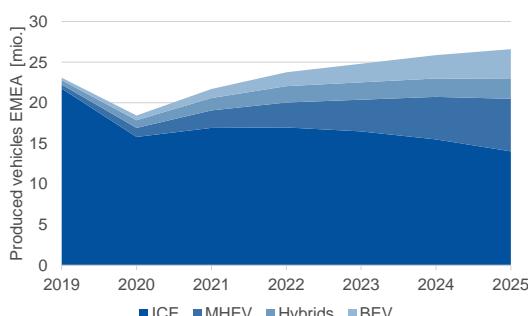


Fig. 1: Vehicles built in Europe (EMEA) 2019-2025 by drive type [1]

As is usual with many new developments, assemblies that were initially presented and successfully brought into series production will have to prove themselves once again against the next generation and in this way the designs successively optimized.

Due to the pressure from politics and society towards concepts of sustainable mobility and the requirements for a smaller carbon footprint but at the same time for more energy density for ranges comparable to combustion vehicles (ICE), this process of optimizing electromobility is currently proving to be highly dynamic.

In this context, it is worth taking a look at materials other than the metallic materials dominant in the automobile. Plastics have already proved repeatedly in the past that they can replace metallic materials and at the same time create added value for end users and operators. This has already been sufficiently demonstrated in the past, for example with intake manifolds or front-end modules [2,3].

In the electrified powertrain, some applications are already hardly conceivable in high-volume production without plastic. One only has to think of connectors and cable sheathing.

However, although plastics with their intrinsic properties of electrical insulation are an obvious option for electrical applications, they are also faced with new challenges. Not only do the high automotive requirements for safety and reliability have to be met but plastics must also cope with the most diverse new tasks assigned to them.

2. Electromobility requirements applying to plastics

The electric powertrain presents a wealth of new challenges to the developer, which can be translated into requirements applicable to plastics. Table 1 lists by way of example some of the most important requirements that can input into the specification of materials.

Table 1: Electromobile requirements applying to plastics

Requirement	Component example	Material property
Flame protection	Components close to the battery	Flame tests according to UL94
Electromagnetic shielding	High-voltage housing	Shielding quality according to CISPR 25
Electric isolation	Busbar holder	Dielectric strength, tracking resistance, electrical resistance
Thermal conduction	Battery adhesives	Thermal conductivity
Electrolyte resistance	Cell housing seal	Swelling behavior, aging behavior
Cooling media resistance	Cooling tubes	Swelling behavior, aging behavior
Mechanical stress (crash)	Battery housing	Modulus of elasticity, tensile strength
Mechanical load (shock)	Charger plug	Impact strength

Material manufacturers are meeting these new requirements by developing novel materials tailored to electromobility – most frequently by the use of appropriate additives or by veneering with other plastics.

3. Plastic properties and their significance regarding application in the electromobile environment

3.1 Flame protection

The most common requirement made of plastics in connection with the electric powertrain is the desire for a flame-retardant material. The background to this requirement is the need for a higher level of safety, especially in the environment of high-energy battery storage systems, which is to be satisfied by the selection of a flame-retardant plastic. Such plastics are often required in the vicinity of battery cells and in most cases the usual UL94 V-0 classification is desired.

The UL94V test set-up is sketched in Fig. 2, while Table 2 lists the most important test and classification parameters [4].

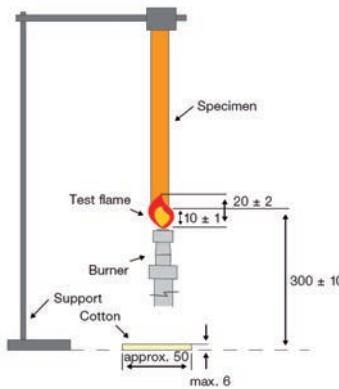


Fig. 2: UL94 test set-up for the flammability test on vertical specimens (UL94 V)

Table 2: Classification of test results according to UL94V testing [4]

Class	V-0	V-1	V-2
Firing time [s]	≤ 10	≤ 30	≤ 30
Burning duration [s]	≤ 50	≤ 250	≤ 250
Dripping while burning	no	no	yes

As can be seen from Table 2, even V-0 class materials, representing the highest fire protection class, are allowed to burn for a short time, which contradicts the widespread assumption that flame-retardant materials do not burn.

In addition, it should be noted that statements in UL94 always relate to a defined wall thickness, in other words, that a material can be given a different classification depending on the thickness (see Table 3). In a material specification it is therefore essential to specify the corresponding minimum wall thickness of the component.

Table 3: Wall-thickness dependence of UL94 tests on the basis of the classification of two exemplary materials

Product / wall thickness	Abbreviation	0.4 mm	0.75 mm	1.5 mm	2.0 mm	3 mm
Ultradur® B4450 G5 HR	PBT-GF25 (FR5x)	V-2	V-2	V-0	V-0/5VA	V-0 / 5VA
Ultramid® A3X2G5	PA66-GF25 (FR52)	HB	V-0	V-0	V-0	V-0 / 5VA

In principle, using UL94V for the specification of materials in the electric drive is not wrong, if one takes into account the informative value of this standard: the UL94V test describes flammability in connection with the self-extinguishing properties of a material, i.e. how the material reacts to a short-lived ignition source. This test was created to reduce the risk of fires in static electrical applications, such as home fuse boxes. The UL94V test thus relates to a short-term thermal event. This might be ignition sources from electric arcs or other events, such as passage through a capacitor. Through their ability to self-extinguish, correspondingly flame-retardant plastics in electric vehicles can help to reduce the risk of these potential ignition sources which could otherwise lead to an uncontrollable battery fire. UL94V was not designed to cover the case of a battery fire already in progress – a so-called thermal runaway – in which energy is continuously supplied by the chemical decomposition of the battery cell components. On account of melting and degradation processes it can be assumed that plastics generally do not withstand these temperatures, even when they do have a V-0 classification.

Looking holistically at the desire for flame-retardant materials in the automotive environment, it can be seen that here there is no consistent approach harmonized across all OEMs. No European legal standard currently prescribes the use of a flame-retardant product. Today's approval processes refer to component testing, described, for example, in UN ECE 100 or UN GTR20 [5, 6].

3.2 Electrical properties

A significant advantage of plastics over metals with regard to the safety of live components is their electrical insulation properties. The most important characteristic values used to

describe these properties are the volume and surface resistances [7, 8], dielectric strength [9] and also the Comparative Tracking Index (CTI) [10], which serves as a measure of tracking resistance.

In the case of the electrical characteristics, it should be noted that by analogy with the mechanical properties these can change with temperature and conditioning state of the material.

While materials with low water absorption, such as PBT, are not negatively influenced by different conditioning states, more hydrophilic materials such as polyamide 6, on the other hand, show a clear dependence [Fig. 3].

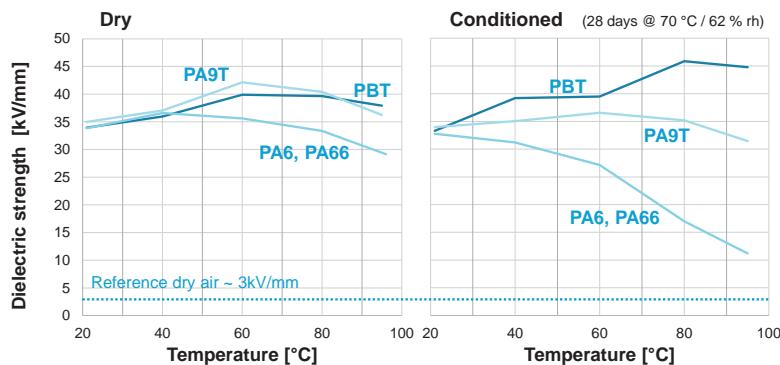


Fig. 3: Dielectric strength of PBT, PA6, PA66 and PA9T plotted against temperature and in different conditioning states

The addition of electrically conductive substances, such as a black coloration with soot, will also have an influence on insulation properties. However, the addition of non-conductive fillers leaves the insulation capacity largely unaffected.

With regard to insulating properties, tracking resistance, which is described by the so-called CTI value, has also been repeatedly discussed very recently (in terms of the history of electromobility). In the CTI test, two probes are applied to a material, between which a conductive solution, a so-called electrolyte, is dripped. This is intended to simulate contamination between the electrodes. As a material parameter, the voltage is measured until a significant leakage current occurs, which ultimately leads to a 'short circuit'. The voltage last applied then describes the tracking resistance.

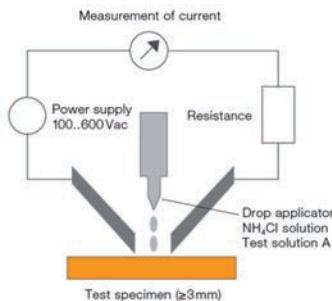


Fig. 4: Test set-up for determining the CTI (according to [10,11])

With regard to CTI testing, it should be noted that there are different standards in the industry for the classification of materials by this test method (see Table 4) [10, 11]. However, what both methods have in common is that a classification above 600 V is not provided – this voltage ceiling therefore means the end of measurement. One reason for this is the possibility of incorrect measurements due to ionization of the air.

Table 4: CTI classification according to UL and IEC [10, 11]

UL 746 A Performance Level Category (PLC)	Voltage [V]	IEC 60112 Insulation class
0	600	I
1	400 - 599	II
2	250 – 399	IIIa
3	175 – 249	
4	100 – 174	IIIb
5	<100	

In practice, however, a measurement above 600 V is not usually necessary, since IEC 60664-1, which is to be used for dimensioning the minimum distances between current-carrying conductors, only takes CTI values up to 600 V into consideration. Nevertheless, IEC 60664-1 also covers operating voltages above 600 V in the dimensioning of minimum distances.

As already mentioned, the CTI simulates a possible contamination. This is also taken into account by IEC 60664-1 in the dimensioning of the minimum distances to be applied. If there is no contamination, as would be expected for sensitive components inside electrical high-voltage components, the CTI will be irrelevant because the standards do not specify any difference in the minimum distance between the material classes.

The relevance is all the greater in the case of components with significantly higher levels of contamination, for example, plug components, such as a charging plug, or other external components.

3.3 Orange coloring in RAL 2003

In order to increase awareness of and thus the safety of high-voltage cables and plugs, an orange-colored marking is required in electric vehicles for cables, busbars and connectors not enclosed in housings. Although not specified in more detail in the standards [6], the majority of the industry has agreed on pastel orange (RAL 2003). Coloring a plastic with this shade can be a challenge, depending on the polymer selected, especially with regard to shade stability after heat aging. While some common materials such as PBT intrinsically have a very stable color behavior, others tend to change color as they age. With PA66, for example, this is accompanied by a marked brown coloration of the uncolored base polymer (Fig. 5).

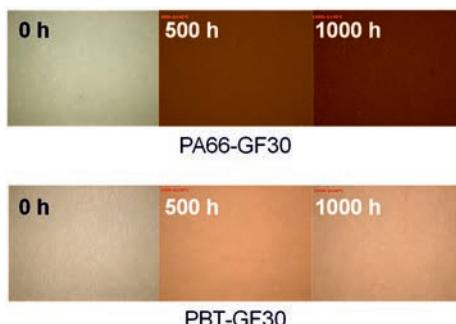


Fig. 5: Color stability of uncolored, unstabilized PA66 and PBT at 140 °C

A corresponding stabilization of the polymer and an adjustment of the color formulation must be taken into account if the desired shade of the compound is to be retained even after aging (Fig. 6).



Fig. 6: Thermal storage of a PA66-GF30 with an optimized orange formulation

Since the orange-colored polymers are used in the immediate vicinity of conductive metals such as copper, the formulation must also be reconciled with this accordingly. Undesired interactions with metal surfaces, as shown in Fig. 7 in the case of Formulation 2 can, under certain circumstances, affect contact resistance, for example. Such formulations should accordingly be avoided if high component quality and operational reliability are to be ensured.

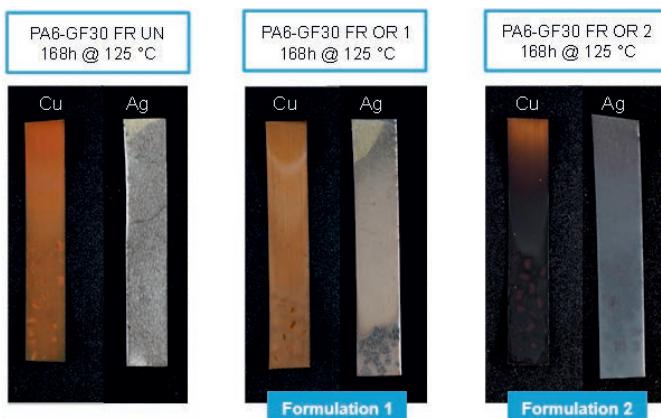


Fig. 7: Interaction of different formulations with metallic conductors (left: uncolored reference; middle: orange formulation 1; right: orange formulation 2)

It goes without saying that in the formulations only substances compliant with regional regulations are used for coloring. However, since the regulations differ greatly from region to region, the material should be chosen carefully and globally uniformly conformant products should be used.

3.4 Thermal conductivity

The thermal conductivity of materials is under discussion in the electromobility field, especially in connection with battery cooling. The thermal challenge as regards the battery is to keep today's lithium-ion battery cells within a favorable temperature range and not to exceed or fall below critical temperatures that could lead to cell damage. As a rule, the battery cells are therefore actively cooled or temperature-controlled by indirect cooling.

In order to achieve the greatest possible cooling effect, the connection of the battery cells to the cooling components is of maximum interest and represents a particular material challenge. Air gaps between cell and cooling system can reduce the effectiveness of the cooling system and should therefore be avoided. Here, highly filled, thermally conductive gap-filler systems based on silicone or polyurethane serve to minimize these air gaps and prevent possible heat build-up (Fig. 8). These systems are applied in liquid or paste form in order to ensure the best possible transition from cell to cooling system.

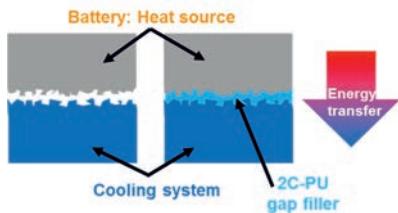


Fig. 8: Schematic of a gap-filler system (left: without gap filler and with air gap; right: optimized with gap filler)

In addition to their thermal properties, the gap fillers must also comply with a number of other constraints that arise from the overall system. Adhesion to both joining partners must be guaranteed over the entire service life. In addition, electrical insulation properties or fire protection properties are often required. The viscosity of the system has a decisive influence on the application of the material and on the associated manufacturing process.

Very recently, BASF has developed a thermally conductive system based on Elastan®, which can be adjusted individually according to customer requirements in order to satisfy the other constraints in addition to thermal conductivity. The most basic characteristics of the system are briefly outlined in Table 5.

Table 5: Properties profile of a PU gap-filler system

Property	Value	Comment
Base material	Elastan®	polyurethane
Thermal conductivity (through-plane) [W/mK]	1-3	ASTM D 5470-12
Fire test according to UL94V [class (wall thickness mm)]	V-0 (1.0)	
Dielectric strength [kV/mm]	>25	
Removability [N/mm ²]	adjustable	pull-off test
Viscosity	adjustable	

4. Summary and outlook

Electromobility offers a diverse range of applications for plastics, which is accompanied by new requirements. These go far beyond the traditional, established challenges for plastics.

In current series production, due to a lack of standardization and empirical data, there is often still a great deal of potential for the functional integration and optimization of assemblies. However, the current highly dynamic environment of electromobility makes it more difficult, compared with established plastic solutions for combustion engines, to make gradual improvements of these components, as sometimes radical concept changes are made at short notice.

In order to be able to have tailor-made solutions ready in the future for electromobility concepts, material manufacturers must work hand in hand with processors and automobile manufacturers along the entire value chain in order to meet the requirements for product safety and ultimately component safety. In this synergistic merger, the challenges of electromobility will continue to lead to sustainable system solutions even in the future.

5. Acknowledgements

The authors would like to thank their colleagues Michael Roth, Klaus Uske, Ingolf Hennig, Andreas Nixdorf and Matthias Bender for their support and constructive discussions with regard to the preparation of this paper.

6. References

- [1] Global Light Vehicle Powertrain Forecast – 1st quarter 2021, LMC Automotive, retrieved from <https://compass.lmc-auto.com/> on 10.06.2021
- [2] BMW - Berstdruckfestes Polyamid für Ansaugrohre [Burst-pressure-resistant polyamide for intake manifolds], Automobile Industry, Vogel Communications Group, retrieved from <https://www.automobil-industrie.vogel.de/berstdruckfestes-polyamid-fuer-ansaugrohre-a-80472/> on 16.06.2021
- [3] Saugrohre aus Ultramid® bei Kosten und Umweltverträglichkeit mit klaren Vorteilen [Intake manifolds made of Ultramid® with clear advantages in terms of costs and environmental compatibility] BASF SE, retrieved from <https://www.bASF.com/global/de/who-we-are/sustainability/we-drive-sustainable-solutions/quantifying-sustainability/eco-efficiency-analysis/examples/saugrohre.html> on 15.06.2021
- [4] UL 94 Standard for safety – tests for flammability of plastic materials for parts in devices and appliances, Norm, Underwriter Laboratories Inc., Northbrook, 2018
- [5] Regulation No. 100 of the United Nations Economic Commission for Europe (UN/ECE) - Uniform conditions for the approval of vehicles with regard to the special requirements for electric drives, legal acts, UN/ECE, 2010
- [6] Global Technical Regulation on the Electric Vehicle Safety (EVS) - Addendum 20: Global Technical Regulation No. 20, standard, United Nations, Geneva, 2018
- [7] DIN EN 62631-3-1 Dielectric and resistive properties of solid insulating materials - Part 3-1: Determination of resistive properties (DC voltage method) - Contact resistance and specific contact resistivity - Basic method (IEC 62631-3-1:2016); German version EN 62631-3-1: 2016, standard, DIN Deutsches Institut für Normung e.V. and VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V., Berlin, 2016
- [8] DIN EN 62631-3-2 Dielectric and resistive properties of solid insulating materials - Part 3-2: Determination of resistive properties (DC voltage method) - Surface resistance and specific surface resistance (IEC 62631-3-2:2015); German version EN 62631-3-2: 2016, standard, DIN Deutsches Institut für Normung e.V. and VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V., Berlin, 2016
- [9] DIN EN 60243-1 Electric dielectric strength of insulating materials - Test methods - Part 1: Tests at technical frequencies (IEC 60243-1:2013); German version EN 60243-1: 2013, standard, DIN Deutsches Institut für Normung e.V. and VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V., Berlin, 2013

- [10] ASTM D3638 - 12 - Standard test method for the comparative tracking index of electrical insulating materials, standard, ASTM International, West Conshohocken, 2012
- [11] IEC 60112 – Method for the determination of the proof and the comparative tracking indices of solid insulating materials, Edition 5.0, 2020-10, standard, IEC International Electrotechnical Commission, Geneva, 2020

Mit gesamtheitlichen Kunststofflösungen die Zukunft der Elektromobilität gestalten

Dr.-Ing. René Holschuh, Dr.-Ing. Thomas Bayerl,
BASF SE, Ludwigshafen

Kurzfassung

Der Wandel der Automobilkultur ist in vollem Gange – der alleinige Blick auf Hubraum und Spitzengeschwindigkeit ist schon lange nicht mehr ausreichend. Die Gesellschaft verlangt nach nachhaltigen, elektromobilen Lösungen. Dieser schnelle Wandel hat aus werkstofflicher Sicht viele neue Chancen und Herausforderungen zugleich gebracht. Selbst die gesetzlichen Regularien bezüglich Sicherheitsanforderungen der Elektrofahrzeuge befinden sich immer noch in der Diskussion. Die wenigen Vorgaben zur Sicherheit von Batterien beziehen sich meist auf Systembetrachtungen und lassen den Entwicklern daher viel Freiraum. In diesem Paper wird diskutiert, wie sich Kunststoffe in diesem Umfeld positionieren und einen positiven Beitrag leisten können.

1. Einleitung

Das Zeitalter der Elektromobilität hat begonnen. Bis zum Jahr 2025 werden in Europa ca. 50 % aller ausgelieferten Fahrzeuge mit elektrischen Antriebskomponenten ausgestattet sein [1]. Dazu zählen neben den vollelektrischen Fahrzeugen (BEV), auch die Abstufungen der Hybridfahrzeuge (PHEV, FHEV und MHEV). Bereits heute ist etwa jedes 6. Fahrzeug mit diesen neuen Komponenten bestückt (Bild 1).

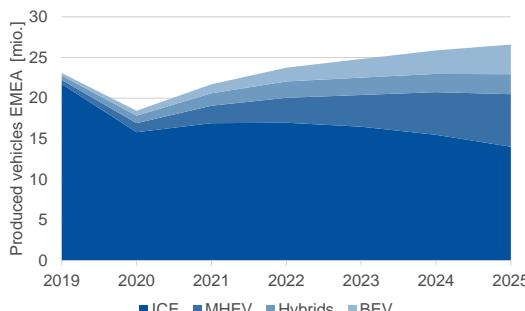


Bild 1: Darstellung der in Europa (EMEA) gebauten Fahrzeuge nach Antriebsart 2019-2025
[1]

Wie bei vielen Neuentwicklungen üblich, werden die zunächst vorgestellten und erfolgreich in Serie gebrachten Baugruppen sich gleich wieder gegen die kommende Generation bewähren müssen und somit die Konstruktionen sukzessive optimiert werden.

Durch den Druck aus Politik und Gesellschaft hin zu nachhaltigen Mobilitätskonzepten und den Anforderungen an einen niedrigeren Carbon Footprint, aber gleichzeitig nach mehr Energiedichte für vergleichbare Reichweite zu Verbrennerfahrzeugen (ICE), gestaltet sich dieser Prozess der Optimierung der Elektromobilität aktuell als hochdynamisch.

In diesem Zusammenhang lohnt sich ein Blick auf Materialien abseits der im Automobil dominanten metallischen Werkstoffe. Kunststoffe haben in der Vergangenheit schon mehrfach bewiesen, dass sie metallische Werkstoffe ersetzen und gleichzeitig einen Mehrwert für Anwender und Nutzer schaffen können. Dies wurde in der Vergangenheit bereits beispielsweise bei Ansaugrohren oder Frontend-Modulen hinlänglich demonstriert [2,3].

Im elektrifizierten Antriebstrang sind bereits heute einige Anwendungen ohne Kunststoff kaum im Großserienmaßstab denkbar. Man denke nur an Konnektoren und Kabelummantelungen. Doch obwohl Kunststoffe mit ihren intrinsisch vorhandenen elektrischen Isolationseigenschaften eine naheliegende Option für elektrische Anwendungen sind, werden sie auch vor neue Herausforderungen gestellt. Es gilt die hohen automobilen Anforderungen an Sicherheit und Zuverlässigkeit zu erfüllen, als auch mit den vielfältigsten neuen Aufgaben zurechtzukommen, die ihnen zuteilwerden.

2. Anforderungen aus der Elektromobilität an Kunststoffe

Der elektrische Antriebsstrang stellt eine Fülle von neuen Herausforderungen an den Entwickler, die in Anforderungen an Kunststoffe übersetzt werden können. Tabelle 1 listet exemplarisch einige der wichtigsten Anforderungen auf, welche zur Spezifikation von Materialien führen können.

Tabelle 1: Elektromobile Anforderungen an Kunststoffe

Anforderung	Beispielbauteil	Materialeigenschaft
Flammschutz	Batterienahe Teile	Flammprüfungen nach UL94
Elektromagnetische Schirmung	Hochvoltgehäuse	Abschirmgüte nach CISPR 25
Elektrische Isolation	Busbarhalter	Durchschlagfestigkeit, Kriechstromfestigkeit, elektrischer Widerstand
Wärmeleitung	Batterieklebstoffe	Thermische Leitfähigkeit
Elektrolytbeständigkeit	Zellgehäusedichtung	Quellverhalten, Alterungsverhalten
Kühlmedienbeständigkeit	Kühlrohre	Quellverhalten, Alterungsverhalten
Mechanische Belastung (Crash)	Batteriegehäuse	E-Modul, Zugfestigkeit
Mechanische Belastung (Stoß)	Ladestecker	Schlagzähigkeit

Die Materialhersteller begegnen diesen neuen Anforderungen mit der Entwicklung neuartiger auf die Elektromobilität zugeschnittenen Materialien – im häufigsten Fall durch den Einsatz entsprechender Additive oder der Verblendung mit anderen Kunststoffen.

3. Kunststoffeigenschaften und deren Bedeutung für ihre Anwendung im elektromobilen Umfeld

3.1 Flammschutz

Die häufigste Anforderung, die in Zusammenhang mit dem elektrischen Antriebsstrang von Kunststoffen gefordert wird, ist der Wunsch nach einem flammgeschützten Material. Hintergrund dieser Forderung ist ein gesteigertes Maß an Sicherheitsbedürfnis besonders im Umfeld der hochenergetischen Batteriespeicher, was durch die Wahl eines flammgeschützten Kunststoffs befriedigt werden soll. Häufig werden solche Kunststoffe in Batteriezellnähe gefordert und meistens wird dazu die gängige UL94 V-0-Einstufung gewünscht.

Die UL94V-Prüfung ist in Bild 2 skizziert, daneben listet Tabelle 2 die wichtigsten Prüf- und Klassifizierungsparameter auf [4].

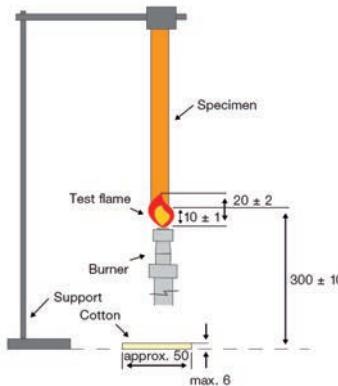


Bild 2: Prüfaufbau nach UL94 für den Brandtest an vertikalen Probekörpern (UL94 V)

Tabelle 2: Klassifizierung von Prüfergebnissen nach UL94V-Prüfung [4]

Klasse	V-0	V-1	V-2
Brennzeit [s]	≤ 10	≤ 30	≤ 30
Nachbrennzeit [s]	≤ 50	≤ 250	≤ 250
Brennendes Abtropfen	nein	nein	ja

Wie aus Tabelle 2 ersichtlich wird, dürfen auch Materialien der Klasse V-0, stellvertretend für die höchste Brandschutzklasse, für eine kurze Zeit brennen, was der weit verbreiteten Annahme, dass flammgeschützte Materialien nicht brennen, widerspricht.

Zudem ist festzuhalten, dass die Aussagen der UL94 immer auf eine definierte Wandstärke bezogen werden, d.h. dass ein Material je nach Dicke eine unterschiedliche Klassifizierung erhalten kann (siehe Tabelle 3). Es ist daher unerlässlich, bei einer Materialspezifikation die entsprechende minimale Wandstärke des Bauteils anzugeben.

Tabelle 3: Wandstärkenabhängigkeit der UL94-Prüfungen anhand der Klassifizierung zweier Beispielwerkstoffe

Produkt / Wandstärke	Kurzzeichen	0.4 mm	0.75 mm	1.5 mm	2.0 mm	3 mm
Ultradur® B4450 G5 HR	PBT-GF25 (FR5x)	V-2	V-2	V-0	V-0/5VA	V-0 / 5VA
Ultramid® A3X2G5	PA66-GF25 (FR52)	HB	V-0	V-0	V-0	V-0 / 5VA

Prinzipiell ist die Heranziehung der UL94V zur Spezifikation von Werkstoffen im elektrischen Antrieb nicht verkehrt, wenn man dabei die Aussagekraft dieser Norm berücksichtigt: die UL94V-Prüfung beschreibt die Entflammbarkeit in Verbindung mit den selbstverlöschenden Eigenschaften eines Materials, d.h. wie das Material auf eine kurzzeitige Zündquelle reagiert. Diese Prüfung wurde ins Leben gerufen, um die Gefahr von Bränden in statischen elektrischen Anwendungen, wie beispielsweise Haussicherungskästen, zu verringern. Die UL94V-Prüfung bezieht sich somit auf ein kurzfristiges thermisches Ereignis. Dies können Zündquellen aus Lichtbögen oder sonstigen Ereignissen, wie dem Durchgehen eines Kondensators sein. Entsprechend flammgeschützte Kunststoffe im Elektrofahrzeug können durch ihre Selbstverlöschung damit helfen, die Gefahr dieser potentiellen Zündquellen zu verringern, die ansonsten zu einem unkontrollierbaren Batteriebrand führen könnten.

Für den Fall eines bereits bestehenden Batteriebrands, eines sog. Thermal Runaways, bei dem kontinuierlich Energie durch die chemische Zersetzung der Batteriezellkomponenten zugeführt wird, wurde die UL94V nicht ausgelegt. Es kann davon ausgegangen werden, dass Kunststoffe diesen Temperaturen durch Schmelz- und Degradationsprozesse i.d.R. nicht standhalten, auch wenn sie eine Einstufung V-0 haben.

Betrachtet man den Wunsch nach flammgeschützten Materialien im automobilen Umfeld ganzheitlich, so ist erkennbar, dass es hier keine harmonisierte – über alle OEMs hinweg – konsistente Herangehensweise gibt. Keine europäische gesetzliche Norm schreibt aktuell den Einsatz eines Flammenschutzproduktes vor. Heutige Freigabeprozesse referieren auf Bauteil-, bzw. Komponententest, beschrieben beispielsweise in UN ECE 100 oder UN GTR20 [5, 6].

3.2 Elektrische Eigenschaften

Ein wesentlicher Vorteil von Kunststoffen gegenüber Metallen im Hinblick auf die Sicherheit von stromführenden Komponenten sind die elektrischen Isolationseigenschaften. Als wichtigste Kennwerte zur Beschreibung dieser Eigenschaften werden die Durchgangs- und

Oberflächenwiderstände [7, 8], die Durchschlagfestigkeit [9] sowie der Comparative Tracking Index (CTI) [10], der als Maß für die Kriechstromfestigkeit gilt, herangezogen.

Bei den elektrischen Kennwerten ist in Analogie der mechanischen Eigenschaften zu beachten, dass diese sich mit Temperatur und Konditionierungszustand des Materials verändern können.

Während Materialien mit geringer Wasseraufnahme, wie z.B. PBT, keine negative Beeinflussung durch unterschiedliche Konditionierungszustände aufweisen, zeigen hydrophilere Werkstoffe wie bspw. Polyamid 6 hingegen eine deutliche Abhängigkeit [Bild 3].

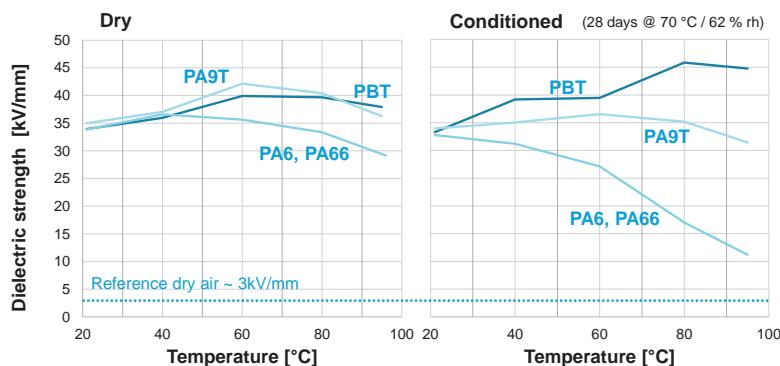


Bild 3: Durchschlagfestigkeit von PBT, PA6, PA66 und PA9T über der Temperatur und bei verschiedenen Konditionierungszuständen

Auch die Zugabe von elektrisch leitenden Substanzen wie z.B. eine Schwarzeinfärbung durch Ruß, haben Einfluss auf die Isolationseigenschaften. Durch die Zugabe von nichtleitenden Füllstoffen bleibt das Isolationsvermögen jedoch weitestgehend unberührt.

Im Hinblick auf die isolierenden Eigenschaften wurde in jüngster (Elektromobilitäts-)Vergangenheit auch immer wieder die Kriechstromfestigkeit diskutiert, die durch den sog. CTI-Wert beschrieben wird. Bei der CTI-Prüfung werden zwei Prüfspitzen auf ein Material aufgebracht, zwischen denen eine leitfähige Lösung, sog. Elektrolyt, getropft wird. Dies soll eine Verschmutzung zwischen den Elektroden simulieren. Als Materialparameter wird die Spannung ermittelt, bis es zu einem signifikanten Kriechstrom kommt, der schließlich zu einem „Kurzschluss“ führt. Die zuletzt angelegte Spannung beschreibt dann die Kriechstromfestigkeit.

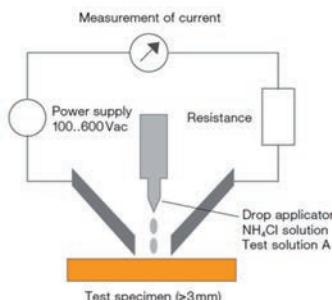


Bild 4: Prüfaufbau zur Bestimmung des CTI (nach [10,11])

Hinsichtlich der CTI-Prüfung ist festzuhalten, dass es in der Branche unterschiedliche Normen für die Klassifizierung von Materialien anhand dieser Prüfmethode gibt (siehe Tabelle 4) [10, 11]. Beiden Methoden ist jedoch gemein, dass eine Klassifizierung über 600 V nicht vorgesehen ist, so dass diese Spannungsobergrenze das Ende der Messung bedeutet. Ein Grund hierfür ist die Möglichkeit des Auftretens von Fehlmessungen durch die Ionisation der Luft.

Tabelle 4: CTI-Klassifikation nach UL und IEC [10, 11]

UL 746 A Performance Level Category (PLC)	Spannung [V]	IEC 60112 Isolationsklasse
0	600	I
1	400 - 599	II
2	250 – 399	IIIa
3	175 – 249	
4	100 – 174	IIIb
5	<100	

In der Praxis ist aber auch eine Messung über 600 V meist nicht notwendig, da die IEC 60664-1, die zur Auslegung von Mindestabständen zwischen stromführenden Leitern heranzuziehen ist, nur CTI-Werte bis 600 V betrachtet. Trotz dessen sind in der IEC 60664-1

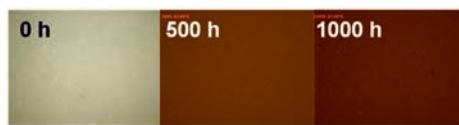
Betriebsspannungen oberhalb von 600 V zur Auslegung des Mindestabstands ebenfalls abgedeckt.

Wie bereits erwähnt simuliert der CTI eine mögliche Verschmutzung. Dies berücksichtigt auch die IEC 60664-1 in der Auslegung der anzuwendenden Mindestabstände. Liegt keine Verschmutzung vor, wie es für sensible Bauteile innerhalb von elektrischen Hochvoltkomponenten zu erwarten wäre, ist der CTI irrelevant, weil das Normenwerk zwischen den Materialklassen keinen Unterschied im Mindestabstand vorgibt.

Die Relevanz ist umso höher bei Bauteilen mit signifikant höherer Verschmutzung wie z.B. bei Steckerkomponenten, wie einem Ladestecker, oder sonstigen außenliegenden Bauteilen.

3.3 Orange-Einfärbung in RAL 2003

Um die Aufmerksamkeit und damit die Sicherheit hochvoltführender Leitungen und Stecker zu erhöhen, ist im Elektrofahrzeug die Verwendung einer orangefarbenen Kennzeichnung für solche Kabel, Stromschiene und Steckverbinder vorgeschrieben, die sich nicht in Gehäusen befinden. Obwohl im Normenwerk nicht näher vorgeschrieben [6], hat sich die Branche mehrheitlich auf pastellorange (RAL 2003) verständigt. Die Färbung eines Kunststoffs mit diesem Farbton kann je nach gewähltem Polymer eine Herausforderung sein, insbesondere im Hinblick auf die Farbtonstabilität nach Wärmealterung. Während einige gängige Werkstoffe wie z.B. PBT intrinsisch ein recht farbstabiles Verhalten zeigen, neigen andere dazu, während der Alterung die Farbe zu ändern. Dies ist z.B. bei PA66 mit einer deutlichen Braunfärbung des ungefärbten Basispolymers einhergehend (Bild 5).



PA66-GF30



PBT-GF30

Bild 5: Farbstabilität von ungefärbtem, nicht stabilisiertem PA66 und PBT bei 140 °C

Eine entsprechende Stabilisierung des Polymers sowie eine Anpassung der Farbrezeptur muss berücksichtigt werden, um auch nach Alterung den gewünschten Farbton des Compounds zu behalten (Bild 6).

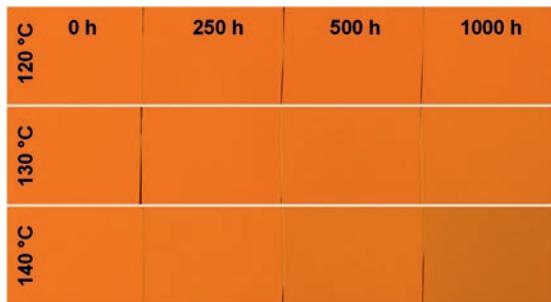


Bild 6: Wärmelagerung eines PA66-GF30 mit optimierter Orangerezeptur

Da die orange eingefärbten Polymere in unmittelbarer Nähe von leitfähigen Metallen wie Kupfer eingesetzt werden, muss die Rezeptur auch entsprechend darauf abgestimmt sein. Unerwünschte Wechselwirkungen mit Metallocberflächen wie in Bild 7 bei Rezeptur 2 dargestellt, können unter Umständen z.B. Übergangswiderstände beeinflussen. Solche Rezepturen sollten entsprechend vermieden werden, um eine hohe Bauteilqualität und -betriebssicherheit zu gewährleisten.

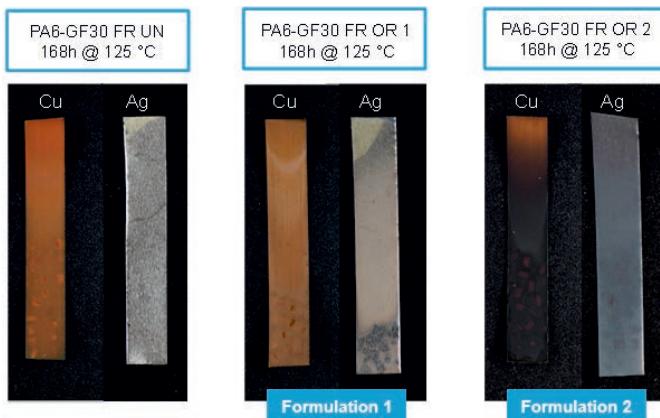


Bild 7: Wechselwirkung unterschiedlicher Rezepturen mit metallischen Leitern (links: ungefärbte Referenz, Mitte: Orangerezeptur 1, rechts: Orangerezeptur 2)

Es versteht sich von selbst, dass nur entsprechend den regionalen Bestimmungen konforme Substanzen in den Rezepturen zur Einfärbung verwendet werden. Da sich aber die Regularien hier regional stark unterscheiden, sollte das Material mit Bedacht gewählt werden bzw. auf global einheitlich konforme Produkte zurückgegriffen werden.

3.4 Thermische Leitfähigkeit

Die thermische Leitfähigkeit von Werkstoffen wird in der Elektromobilität insbesondere im Zusammenhang mit der Batteriekühlung diskutiert. Die thermische Herausforderung rund um die Batterie liegt darin, die heutigen Lithium-Ionen-Batteriezellen in einem günstigen Temperaturbereich zu halten bzw. kritische Temperaturen, die zu einer Zellschädigung führen könnten, nicht zu über- bzw. unterschreiten. In der Regel werden die Batteriezellen deswegen über eine indirekte Kühlung aktiv gekühlt bzw. temperiert.

Um eine möglichst hohe Kühlwirkung zu erzielen, ist die Anbindung der Batteriezellen an die Kühlkomponenten von höchstem Interesse und stellt dabei eine besondere werkstoffliche Herausforderung dar. Luftspalte zwischen Zelle und Kühlsystem können die Wirksamkeit des Kühlsystems verringern und sind daher zu vermeiden. Hier dienen hochgefüllte, thermisch leitfähige Gapfillersysteme auf Silikon- oder Polyurethanbasis dazu, diese Luftspalte zu minimieren und mögliche Wärmestaus zu vermeiden (Bild 8). Die Systeme werden in flüssiger bzw. pastöser Form aufgetragen, um einen bestmöglichen Übergang von Zelle zu Kühlsystem zu gewährleisten.

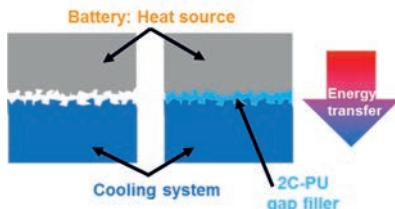


Bild 8: Schematischer Einsatz eines Gapfillersystems (links: ohne Gapfiller mit Luftspalt; rechts: optimiert mit Gapfiller)

Neben den thermischen Eigenschaften müssen die Gapfiller auch eine Reihe weiterer Randbedingungen erfüllen, die sich aus dem Gesamtsystem bedingen. Die Haftung muss auf beiden Fügepartnern dem Einsatz entsprechend über der Lebensdauer gewährleistet sein. Zudem sind oftmals elektrische Isolationseigenschaften oder auch Brandschutzeigenschaften gefordert. Die Viskosität des Systems hat entscheidenden Einfluss auf die Applikation des Materials und den damit verbundenen Fertigungsprozess.

BASF hat in jüngster Vergangenheit ein thermisch leitfähiges System auf Elastan®-Basis entwickelt, welches je nach Kundenbedarf individuell eingestellt werden kann, um neben der thermischen Leitfähigkeit auch die übrigen Randbedingungen zu erfüllen. Die grundlegendsten Kennwerte des Systems sind in Tabelle 5 kurz umrissen.

Tabelle 5: Eigenschaftsprofil eines PU-Gapfillersystems

Eigenschaft	Wert	Bemerkung
Basismaterial	Elastan®	Polyurethan
Thermische Leitfähigkeit (through plane) [W/mK]	1-3	ASTM D 5470-12
Brandtest nach UL94V [Klasse (Wandstärke mm)]	V-0 (1,0)	
Durchschlagfestigkeit [kV/mm]	>25	
Entfernbarkeit [N/mm ²]	einstellbar	Stirnzugversuch
Viskosität	einstellbar	

4. Zusammenfassung und Ausblick

Die Elektromobilität bietet für Kunststoffe ein vielfältiges Anwendungsspektrum, welches mit neuen Anforderungen einhergeht. Diese gehen weit über die traditionellen, etablierten Herausforderungen an Kunststoffe hinaus.

In den aktuellen Serien finden sich häufig aufgrund fehlender Standardisierung und Erfahrungswerten noch viel Potential zur Funktionsintegration und Optimierung von Baugruppen. Das aktuell hochdynamische Umfeld der Elektromobilität erschwert jedoch, verglichen mit etablierten Kunststofflösungen für Verbrenner, die sukzessive Verbesserung dieser Bauteile, da teilweise radikale Konzeptänderungen kurzfristig vollzogen werden.

Um in Zukunft maßgeschneiderte Lösungen für die Konzepte der Elektromobilität bereit halten zu können, müssen Materialhersteller zusammen mit Verarbeitern und Automobilherstellern entlang der kompletten Wertschöpfungskette Hand in Hand arbeiten, um die Anforderungen an Produktsicherheit und letztendlich Bauteilsicherheit zu erfüllen. In diesem synergetischen Zusammenschluss werden die Herausforderungen der Elektromobilität auch in Zukunft zu nachhaltigen Systemlösungen führen.

5. Danksagung

Die Autoren danken den Kollegen Michael Roth, Klaus Uske, Ingolf Hennig, Andreas Nixdorf und Matthias Bender für die Unterstützung und die konstruktiven Diskussionen im Hinblick auf die Anfertigung dieses Papers.

6. Quellen

- [1] Global Light Vehicle Powertrain Forecast – Quarter 1, 2021, LMC Automotive, von <https://compass.lmc-auto.com/> abgerufen am 10.06.2021
- [2] BMW - Berstdruckfestes Polyamid für Ansaugrohre, Automobil Industrie, Vogel Communications Group, von <https://www.automobil-industrie.vogel.de/berstdruckfestes-polyamid-fuer-ansaugrohre-a-80472/> abgerufen am 16.06.2021
- [3] Saugrohre aus Ultramid® bei Kosten und Umweltverträglichkeit mit klaren Vorteilen, BASF SE, von <https://www.bASF.com/global/de/who-we-are/sustainability/we-drive-sustainable-solutions/quantifying-sustainability/eco-efficiency-analysis/examples/saugrohre.html> abgerufen am 15.06.2021
- [4] UL 94 Standard for Safety – Tests for Flammability of Plastic Materials for Parts in Devices and Appliances, Norm, Underwriter Laboratories Inc., Northbrook ,2018
- [5] Regelung Nr. 100 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE) — Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich der besonderen Anforderungen an den Elektroantrieb, Rechtsakte, UN/ECE, 2010
- [6] Global Technical Regulation on the Electric Vehicle Safety (EVS) - Addendum 20: Global Technical Regulation No. 20, Norm, United Nations, Genf, 2018
- [7] DIN EN 62631-3-1 Dielektrische und resistive Eigenschaften fester Isolierstoffe - Teil 3-1: Bestimmung resistiver Eigenschaften (Gleichspannungsverfahren) - Durchgangswiderstand und spezifischer Durchgangswiderstand - Basisverfahren (IEC 62631-3-1:2016); Deutsche Fassung EN 62631-3-1:2016, Norm, DIN Deutsches Institut für Normung e.V. und VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V., Berlin, 2016
- [8] DIN EN 62631-3-2 Dielektrische und resistive Eigenschaften fester Isolierstoffe - Teil 3-2: Bestimmung resistiver Eigenschaften (Gleichspannungsverfahren) - Oberflächenwiderstand und spezifischer Oberflächenwiderstand (IEC 62631-3-2:2015); Deutsche Fassung EN 62631-3-2:2016, Norm, DIN Deutsches Institut für Normung e.V. und VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V., Berlin, 2016

- [9] DIN EN 60243-1 Elektrische Durchschlagfestigkeit von isolierenden Werkstoffen - Prüfverfahren - Teil 1: Prüfungen bei technischen Frequenzen (IEC 60243-1:2013); Deutsche Fassung EN 60243-1:2013, Norm, DIN Deutsches Institut für Normung e.V. und VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V., Berlin, 2013
- [10] ASTM D3638 – 12 - Standard Test Method for Comparative Tracking Index of Electrical Insulating Materials, Norm, ASTM International, West Conshohocken, 2012
- [11] IEC 60112 – Method for the determination of the proof and the comparative tracking indices of solid insulating materials Edition 5.0 2020-10, Norm, IEC International Electrotechnical Commission, Genf, 2020

Polypropylene films and injection-molding resins for In-Mold Structural Electronics (IMSE®)

Joint development efforts to create new grades of polypropylene (PP) optimized for IMSE®

Antti Keränen Ph.D., **Topi Wuori**, Ph.D. **Janne Asikkala**,

TactoTek Group, Oulu, Finland;

Eva Garcia Biosca, Dipl.-Ing. (FH) **Andreas Benndorf**,

Repsol, Madrid, Spain

Abstract

In this paper is described the TactoTek and Repsol joint development efforts to create new grades of polypropylene (PP) optimized for IMSE®.

1. TactoTek

TactoTek is dedicated to developing, industrializing and commercializing IMSE® technology that transforms the way electronics are designed and built. This technology enables design innovation by adding electronic functions to surfaces with complex form factors in order to create smart three-dimensional structures. Features such as controls, sensors, illumination and communications are embedded in thin 3D surfaces of the plastic. In addition, IMSE enables a significant reduction of weight and assembly depth.

2. Repsol

Repsol is a global multi-energy company that is leading the energy transition with its ambition of achieving zero net emissions by 2050. Repsol is already a supplier of multiple products for the automotive sector, including fuels, lubricants, and different polymeric materials such as polypropylene, polyethylene, and polyols, which may be found in numerous interior and exterior vehicle parts.

Polyolefins are the most widely used polymers in the automotive sector due to their exceptional versatility, superior physical and mechanical characteristics, and light weight, which thus reduces fuel consumption and emissions.

Repsol has invested in a new reactor for an advanced polymer plant in order to manufacture very high impact resistance polypropylene (VHI PP) for the automotive industry at its industrial complex in Tarragona. Highly specialized polypropylene polymers are marketed

under the Repsol Impacto® brand for the automotive sector. This new VHI PP range will add great value to the automotive industry due to its extraordinary impact resistance and lightness for interior and exterior applications, technical parts, safety parts, and batteries.

Repsol's chemicals business is committed to greater efficiency in industrial processes geared towards the circular economy, aiming to recycle the equivalent of 20% of its polyolefin production by 2030. The company has promoted a new circular economy model to recover materials used in cars that have reached the end of their useful life in order to obtain new high-performance materials within the Repsol Reciclex® range. Additionally, Repsol has developed a new product portfolio for 3D printing that can be used for industrial functional prototypes and final parts making it ideal for the automotive industry.

Repsol has made an equity investment in the Finnish start-up TactoTek, through its investment fund Repsol Corporate Venturing.

3 In-Mold Structural Electronics (IMSE®)

In-Mold Structural Electronics (IMSE) manufacturing differs from conventional electronics, where components are reflow-soldered to printed circuit boards and the final part is assembled from several sub-parts. TactoTek IMSE integrates and encapsulates printed electronics and electronic components within 3D injection-molded plastics. Core manufacturing processes are printing, surface mounting, forming and film-insert molding. Taken individually, all of these processes are mature and TactoTek uses equipment suitable for mass production. However, standard processes are combined in a unique way during manufacturing.

Typically, high-end plastics such as polycarbonate (PC) and polymethylmethacrylate (PMMA) are the materials of choice due to their good optical properties. However, the material properties of these high-end materials present certain challenges. For example, both PC and PMMA are susceptible to stress cracking, which calls for additional consideration in the case of parts subject to constant bending. In addition, PC can only tolerate mild chemicals, which can limit application areas unless additional protection, such as coating, is used. The lower processing temperature of PP is an advantage compared to PC, because in IMSE, electronic components are inside the plastic.

4. Why polypropylene (PP)?

Polypropylene is an ideal material for IMSE applications to exploit the potential of in-mold electronics especially when the focus is the automotive sector. Nowadays polycarbonate (PC) and polymethylmethacrylate (PMMA) are the materials currently available for IMSE, but

when the properties and performance of polypropylene are considered closely, PP becomes an appealing alternative for IMSE applications.

First of all, polypropylene is a material widely used in the automotive industry. Reasons why polypropylene is a material of choice are related to the fact that it is available in low viscosities, thereby ensuing high flowability and good processability, while polyolefins also permit lower processing temperatures than do high-end plastics, thereby enabling energy savings during production. The lower processing temperature of PP is an advantage compared to PC because, in IMSE, electronic components are inside the plastic.

Polypropylene is a tough and impact-resistant material thereby ensuring part integrity and also a long-time performance that gives not only processing advantages but presents an alternative to PC or PMMA.

PP shows excellent chemical stability compared to PC or PMMA. High chemical stability allows IMSE to conquer new application areas, such as automotive exteriors and additional segments in home appliances responding to the most demanding needs.

The main challenge in PP development is to improve optical transparency for illumination purposes. High haze is the main contributor to lower optical performance as compared to PC or PMMA.

To certify materials for a complete polypropylene IMSE solution two different products needed to be developed. On the one hand, an appropriate material for injection molding to be used in IMSE requires high transparency with low light scatter. Even if PP is a translucent material it is also true that is a good light diffuser and the transmission of about 90% required for IMSE applications was achievable. Specially designed PP enables a good balance to be found between transparency and diffusion that firstly could offer the highest light output possible and thus the highest transmission and secondly, ensure long time performance under harsh LED lighting conditions. To achieve these two aspects new polypropylene injection resins will be developed during the project. Customized light management and customized surface design are becoming more and more important and, in particular, the transition between glossy and matte surfaces is also an aspect that would be considered.

On the other hand, there is the development of two PP-based film structures: one film structure is used as a carrier for pick-and-place components; the film substrate could be back-printed via standard screen printing processes with decorative and conductive inks after high-pressure forming and it could be back-molded with transparent and translucent resins. The ideal material as the carrier had furthermore to have certain optical and thermal-mechanical properties to be fully compatible with silver and dielectric inks.

A second film is applied on the decorated front side of the part, with the help of this film additional properties can be incorporated into the IMSE part, for example, optical effects. By applying a UV-curable hard coating to the films, scratch resistance could also be improved. Polypropylene will allow the building of robust aesthetic surfaces and customizable designs responding to the most demanding needs of the sector.

Secondary challenges are the adhesion between film and injection-molding resin to ensure structural integrity. Film and injection-molding adhesion can be improved by selecting suitable inks that bind PP film and the injection-molding resin. There are several commercially available for choice, depending on the required modifications to PP film and the resin adhesion promoter or otherwise alternative film-resin structures can be considered to ensure the final application integrity. Repsol is modifying the PP resins to improve their optical properties and possibilities for helping with film-resin adhesion.

Polypropylene is a lightweight material compared to PC and PMMA so the use of PP can produce up to 20% additional weight reduction in final parts. Weight reduction has two benefits for the automotive sector: the first is related to sustainability, because weight reductions allow the reduction of CO₂ emissions. This is an important challenge for the sector, but also produces a cost-benefit due to the savings on a polymer material.

Sustainability is also an important topic when new materials and applications needed to be developed. To know how a device will perform economically and ecologically in the life cycle itself, taking into account how much electricity or power it consumes in the production steps and obviously when the end of life arrives, it is necessary to think about recyclability to close the life cycle and also about the feasibility of producing new devices based on recycled materials.

When the development is completed it would be necessary to make a detailed life cycle study but as regards the production steps, since the process temperature is lower for PP than for PC or PMMA, we will expect a positive evaluation for PP in the compared energy balance. Another important aspect to be considered is that PP is a material that could be easily recycled either by mechanical or chemical processes.

5. Experiment

5.1 Aims and setting

The aim of the experiment is to set expectations for the future industrial exploitation of a new, polypropylene-based material set in in-mold electronics production. The method is to perform a first complete manufacturing cycle for an electronically functional 3D device using PP as a structural material as well as a substrate material for electronics and printed decoration. The

manufacturing trials are being performed at the TactoTek plant in Oulu, Finland, during the spring and summer of 2021.

The specific manufacturing process applied is an application of Injection-Molded Structural Electronics (IMSE):

- i. Screen printing of conductive patterns, dielectric layers and decoration layers on a PP film substrate
- ii. Attachment of components to the substrate in a standard SMT process using conductive adhesives
- iii. Forcing the flexible electronics assembly into 3D form by high-pressure thermoforming (HPF)
- iv. Overmolding the 3D electronics assembly using the assembly as an insert in standard PP injection molding

Material layout of the experimental product is depicted in **Fig. 1**. As all the main features of IMSE assembly - including multilayer wiring and electronic components - are included, the variety of different materials, and just as importantly material interfaces, is substantial.

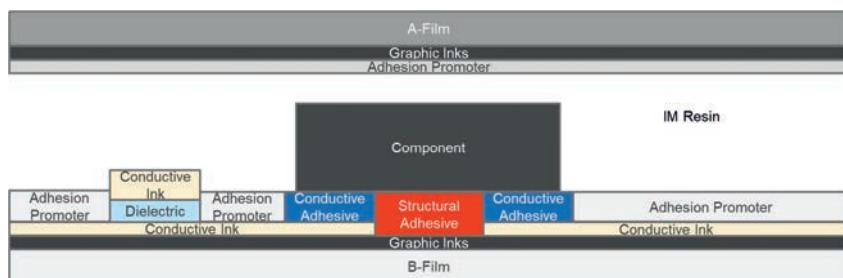


Fig. 1: Diagram of the materials used in a typical IMSE part. Note the number of material interfaces in, for example, comparison with 'standard in-mold electronics', where components and multilayer wiring are not present.

The goal here is not to give a 'final recipe' or definite results on product-proof material set and process, but rather the first results signaling the feasibility of the PP-based system together with the challenges identified in the early stage with regard to commercial level recipes.

The device produced is a typical IMSE test part (**Fig. 2**) with a simple electronic functionality (LED lighting) in 3D form.

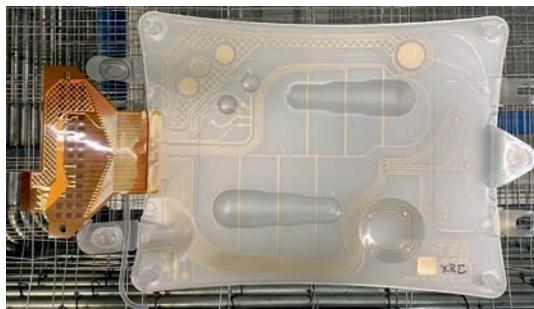


Fig. 2: The final part together with FPC connector assembled. Main dimensions of the part: 194mm x 145mm x 3.4mm.

5.2 Materials

As the results presented are of a preliminary nature and thus subject to further studies en route to more definite results and applications, we have chosen not to name most of the material vendors and types.

Repsol is developing a phthalate-free high-fluidity polypropylene resin for IMSE® technology. It will be designed to show special optical properties to meet the requirements for Printing electronics applications, achieving very similar optical properties to a PP random. Due to its structure and additive package, the material will offer good transparency, excellent gloss, high stiffness, thermal performance and durability. In addition, the grade will show very low warpage and its excellent processability will allow an easy filling of molds and short cycle times as required for IMSE technology. The material used here is a development version of the resin.

Repsol is also developing a film with excellent optical properties, transparency and stability performance with printing and conductive inks. The film is specially designed to meet IMSE requirements in the manufacturing process – that means activation for color ink adhesion, dimensional stability and homogeneity enabling the printing of conductive inks and material lots in thermoforming. The film is able to be used in this application due to its electrical properties, illumination performance and the advantages within operating range temperature. The film used here is a version of the development film made under trial laboratory conditions and not highly optimized for mass production at this stage.

The conductive and dielectric screen printing inks are the typical ones used in thermoplastic-based systems; not yet thoroughly tested in the complete PP-based IMSE system. The major difference in printing materials in comparison to ones for the more common PC structure is

the curing temperature: PP demands a significantly lower curing temperature (~80°C) than PC (up to 130°C), so the materials must comply. For standard LED components and FPC connector tail and assembly, the 'first guess' materials and material dimensions are adopted from the PC stack.

The main caveat in the material set is the dimensional stability of the experimental films: In repeated heating cycles and thermoforming in the process, films tend to warp strongly. At the moment, the main reason for this is put down to a film thickness variation of more than +20% transverse to web direction (Fig. 3). Improvement of this is a matter simply of better dimensional control in future mass production; in the early experimental phase this is to be expected.

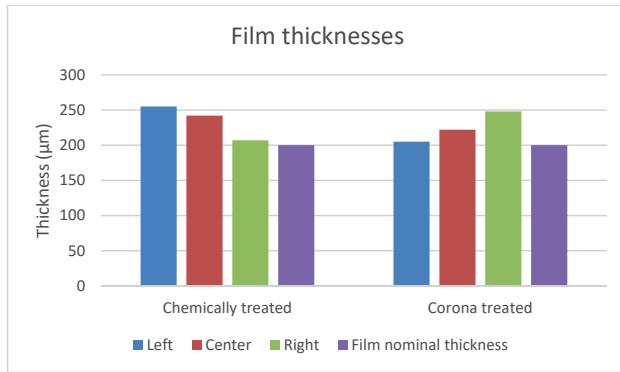


Fig. 3: Film thickness variation across the 400mm web.

5.3 Results

5.3.1 Printing

In order to improve dimensional stability during printing cycles, the films are pre-heated. Pre-heating conditions are 30 minutes at 90°C. In this phase, the films get somewhat warped, but fit for the screen printing process.

The ink transfer process works as expected. The figures (layers) are formed smoothly and with the required accuracy on the film. However, as the films' dimensions change further during curing cycles, inter-layer positioning is challenging. This can be handled in general by adjusting pre-heating conditions and by compensating dimensional changes in layer dimensions. Here, however, these actions would not suffice because of heavy warping and different dimensional changes from sample to sample. These are both expected to be

improved when the manufacturing process is taken from the laboratory scale to the industrial process. For general test purposes, we used also an UV-curable dielectric ink for printed cross-overs. The thermal load in UV curing causes even more marked warping (**Fig. 4**).

Despite the highlighted dimensional stability issues, we were able to make a set of working circuits without other major material- or process-related problems.

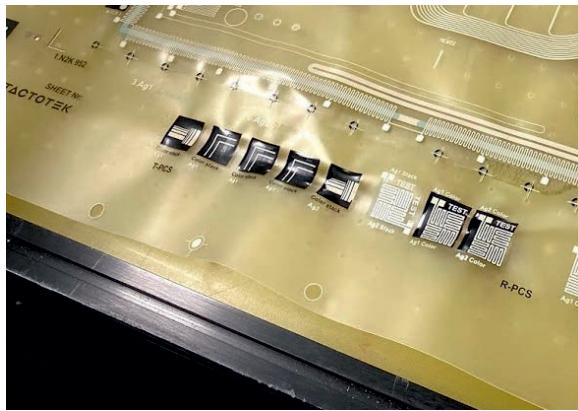


Fig. 4: Substrate warping after all printing cycles. UV curing of dielectric ink on test patterns provides a looking-glass view of the warping phenomena. Warpage in other areas is far less marked.

5.3.2 Component mounting

The key step in IMSE technology is component surface mounting before thermoforming in the standard 2D SMT process. Obviously, this requires flat substrates. Despite the warping inhibiting repeated accurate positioning, we were able to obtain both mechanical and functional LED attachment in many cases. That is enough for the purpose of an early assessment of the feasibility of subsequent process steps and of the overall process.

5.3.3 Thermoforming

In this trial, the aim is not to find extremes for PP thermoforming in order to establish proper IMSE design guidelines. Thus, we chose rather mild forms (see **Figs. 2** and **5**). Again, the problem we face is the films' dimensional stability. As our tools are designed for a different material set balanced for process time shrinkage, we had to force the substrates against forming tool positioning pegs, sometimes breaking the substrate in the peg location. Again,

we were able to make enough working samples in the correct form. Moreover, PP maintains its forced form as expected. This is crucial for not only the final part, but also for subsequent injection molding, where the assembly has to fit rather accurately to the molding tool.

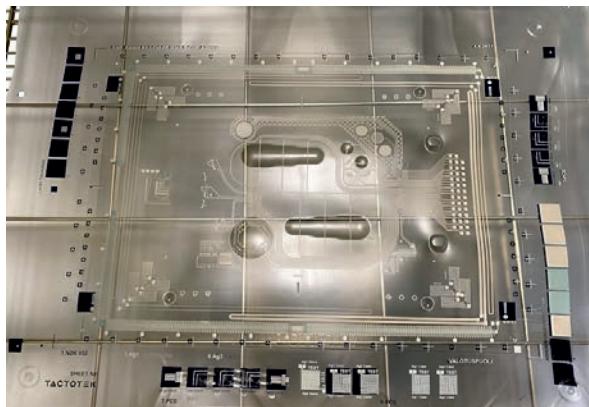


Fig. 5: Fully assembled electronics film after thermoforming. Note that as expected warping has largely disappeared in the forming area due to the nature of the process.

5.3.4 Film cutting and connector assembly

The films were cut to the dimensions of the mold with a standard punch die cutter. Again fitting to the tool was somewhat troublesome due to the shrinkage of the substrate.

The wiring to the external electronics is realized using an FPC tail connected to the substrate by ACF bonding. Here yet another challenge due to shrinkage is encountered. The contact-point pitch on the substrate, when uncompensated, does not match the pitch on the FPC. We therefore aligned the tail such that we secured some of the electronic functionalities, if not all, working via the established physical bus. The functional assembly before the molding step in the test jig is shown in **Fig. 6**.

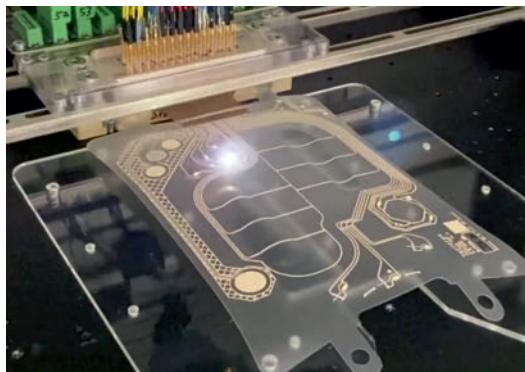


Fig. 6: Functional 3D formed film together with connector FPC in the electronics tester. Note the functional LED and the brackets for fixing the assembly to the injection mold.

5.3.5 Injection molding

The key parameters for overmolding the assembly with PP are a melt temperature of 220°C and a mold temperature of 75°C. As the mold is designed for PC-based system, we found that PP material that was less viscous tended to leak out of the mold. This in turn caused some of the B-films to tear during demolding of the part. Otherwise the molding behavior of the system was excellent. We found no washing-out of materials or other problems arising from the change from the PC system to the PP material stack. Most notably the LEDs stay in position and retain their functionality. The final 'product', a functional structural electronics part made of polypropylene, is shown in **Fig. 7**.

Finally, the part is tested for inter-material adhesion by means of peel strength testing. The direct adhesion between the film and the injection material is 4 N/cm and 8 N/cm for chemically treated film and corona-treated film, respectively. Satisfactory figures for a given product are of the order of 2-5 N/cm, depending on the application. In some cases, the PP substrate tears within itself, due to some of the substrate material sticking to the molded material when peeling. This confirms that the PP-PP interface works in the way expected for the natural adhesion of thermoplastic material to itself under optimal molding conditions for insert molding. The tested peel strength of conductive ink-PP is tested to be of the order of 2 N/cm rather symmetrically on the printed surface and on the molded surface against the ink. In the complete test run, we made 36 parts, of which 5 were taken as process test parts. Five parts went completely non-functional, and of the rest, 26 parts are partially functional.

The statistics are based on low numbers as this is the first full IMSE run for such a material combination, but it does give the desired baseline for further studies.

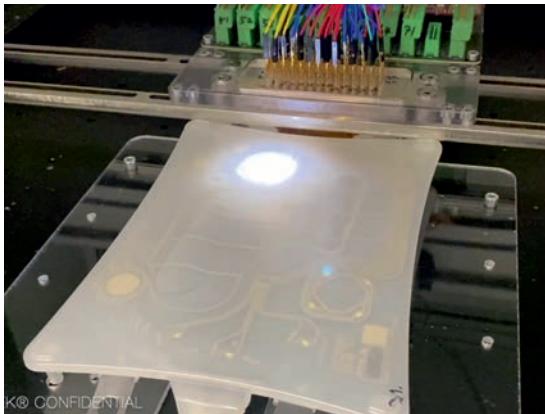


Fig. 7: Functional polypropylene structural electronics part

At this time any assessment of the strengths of other interfaces and interface chains, such as component-structural adhesive-substrate, graphic ink-injection resin or adhesion promoter-conductive ink, is premature since this is after all a work in progress.

6. Conclusion and outlook

The outcome of the development work is an IMSE™-verified polypropylene material stack including PP films, a suitable ink family, adhesives and injection-molding resin with known optical and material performance. This will enable the creation of a new kind of PP structure with intelligent surfaces.

We have performed a trial run for a complete IMSE product-like device using a polypropylene system. Both the substrate films and the injection material are polypropylene. In the first run, mostly working parts (with limitations) were made, showing material and inter-material integrity of a high level, highlighted by generally functional circuits and the absence of the washing-out of materials. On account of the low statistics and experimental status of some of the materials and the early status of process optimizations from design to manufacturing, one cannot draw definite conclusions concerning specific product feasibility. However the relative success of the trial encourages us to take the next steps towards commercial-level

polypropylene-based material stacks for use in structural electronics. Also, key challenges have been identified and found to be open to optimization instead of posing a serious road-block.

Looking into the future and becoming inspired by what could potentially be possible with IMSE, here it is all about providing unknown opportunities to designers combining the touch and feel that PP-finishing technologies, including natural textures and appearance, can provide on the one hand, while the other trend is related to the functional integration, light weight and chemical stability that will enable IMSE™ to expand into the new application areas, such as automotive exteriors and additional segments in home appliances, that only polypropylene can offer.

Lightweight TPE for weight-reduced automotive applications

BE SMART – MAKE IT LIGHTWEIGHT

Dipl.-Ing. (FH) **Martina Hetterich, Matthias Michl**,
KRAIBURG TPE GmbH & Co KG, Waldkraiburg

Abstract

Especially in the automotive sector, weight savings lead to a multitude of benefits, which is why KRAIBURG TPE entered into cooperation with 3M™ and developed materials to meet the need for lightweight solutions. Lightweight TPEs benefit from material properties such as adhesion and processability in the injection-molding and extrusion processes to form multi-component parts, as well as very good sealing properties. So far, the material solution is unique on the market. This is due to its density of up to 0.7 g/cm^3 as a solid material without the use of any special processes or foaming processes – this corresponds to a saving of over 25% compared to the next lightest TPE. To address sustainability concerns, TPEs can be fed back into the production process and are therefore suitable for in-process recycling. Also, less material is required, leading to a more efficient use of the resources needed and supporting the concepts of sustainability of OEMs, processors and suppliers. The special surface finish combined with UV resistance also enables the use of these novel materials specifically for the outdoors and for applications in a high assembly position. Lightweight TPEs are offered in three specific grade ranges but are highly customizable to meet individual requirements and ideas. With this material, component manufacturers and producers as well as OEMs and their developers are invited to rethink existing product ideas.

1. Introduction to the state of the art and innovation drivers

Due to their material properties, versatile application possibilities and cost-efficient processability, thermoplastic elastomers (TPE) have experienced a rapid development since the 1990s. This can be seen in a variety of applications, including their use in the automotive market in the vehicle exterior, interior and also in the powertrain.

In addition to TPEs based on polyurethane (TPU), styrene block copolymers (TPS) and crosslinked rubber (TPV), polyvinyl chloride (PVC) and thermally irreversibly crosslinked

elastomers such as ethylene-propylene-diene rubber (EPDM) are also used in corresponding applications. What these materials have in common is primarily their elastic properties and a hardness in the Shore A range. An overview of the various soft materials and their typical densities is shown in Table 1.

Table 1: Soft material classes and typical densities

Material	Typical density in g/cm ³
PVC	1.3 ... 1.5
EPDM	1.1 ... 1.3
TPU	1.1 ... 1.3
TPS	0.9 ... 1.2
TPV	0.9 ... 1.1

A reduction in density and thus weight savings in the component was only possible in the past by foaming.

A distinction is drawn between chemical and physical foaming. In chemical foaming, the blowing agent is formed by the chemical decomposition of an additive. In physical foaming, the blowing fluid is dissolved in the melt and foams when pressure drops or temperature rises.

Chemical blowing agents are often solids that decompose at higher temperatures while releasing gases. They need to be very evenly distributed in the substrate and their decomposition temperature must correspond to the processing temperature of the polymer.

One possibility of physical foaming is the evaporation of relatively low-boiling substances, such as monomers or solvents, that are incorporated in the molding compounds. Due to their acknowledged poor environmental compatibility, many of these substances are no longer used for foaming. If the melt is injected too slowly, it will foam up during mold filling and streaks will appear on the surface of the molded part.

As an alternative the method of structural foam molding with physical blowing agents is used, for example, MuCellTM or OptifoamTM, in which CO₂ or N₂ are used as blowing gas. With physical blowing agents, higher foaming levels can in principle be achieved as compared to chemical blowing agents. Foaming with CO₂ or N₂ is to be classified as more environmentally friendly than the use of low-boiling hydrocarbons. However, outlay on the machine and process control is much greater. [1]

Due to all these limitations, KRAIBURG TPE set itself the task of developing materials that have lower densities and that thus make weight savings possible without the need to resort to foaming methods.

2. Cooperation for material development: 3M and KRAIBURG TPE

3M™ glass bubbles proved to be a suitable filler for the development of lightweight TPE.

3M glass bubbles are microscopic hollow glass balls made of water-insoluble, chemically stable borosilicate glass and which have a low density. Each hollow glass ball is characterized by its perfect spherical shape. The different particle sizes of the individual 3M glass bubbles ensure an optimal packing density compared to irregularly shaped mineral fillers. The range covers average nominal densities from 0.125 to 0.60 g/cm³ with isostatic compressive strengths of 17 to 2000 bar. [2]

In order to incorporate 3M glass bubbles gently into a polymer melt, it is recommended to use a twin-screw extruder or a BUSS kneader with a side stuffing unit, which should be attached in the last third of the screw before the screw tip. The screw channels of the extruder must be adjusted to a minimum of shear loading following the introduction of the 3M glass bubbles. Distributive mixing elements are preferably to be used. Aggressive, dispersive mixing elements such as returning elements and kneading blocks are not recommended.

In order to keep breakage of the 3M glass bubbles to a minimum, the hollow glass balls should only be fed in at the point in the extruder where the polymer has completely melted. The most uniform feed can be achieved with a side stuffing unit with screw drive. In addition, it is recommended to keep the speed of the extruder screw and the pressure in the extruder as low as possible. [3]

In addition to optimal production equipment in terms of metering and compounding, creating the formulation was a challenge in the development of the lightweight TPE in order to ensure a high survival rate, uniform distribution and good integration of the 3M glass bubbles into the matrix. 3M and KRAIBURG TPE were together able to select an optimal hollow glass ball from the portfolio which was sturdy enough for the thermoplastic processing processes but nevertheless light enough to make a significant reduction in the weight of the materials.

Thanks to good cooperation between 3M and KRAIBURG TPE, this was successfully implemented and resulted in the market launch of the lightweight TPEs. The survival rate of

over 95% determined by means of ashing and followed by density measurement can also be confirmed by REM images; see Fig. 1.

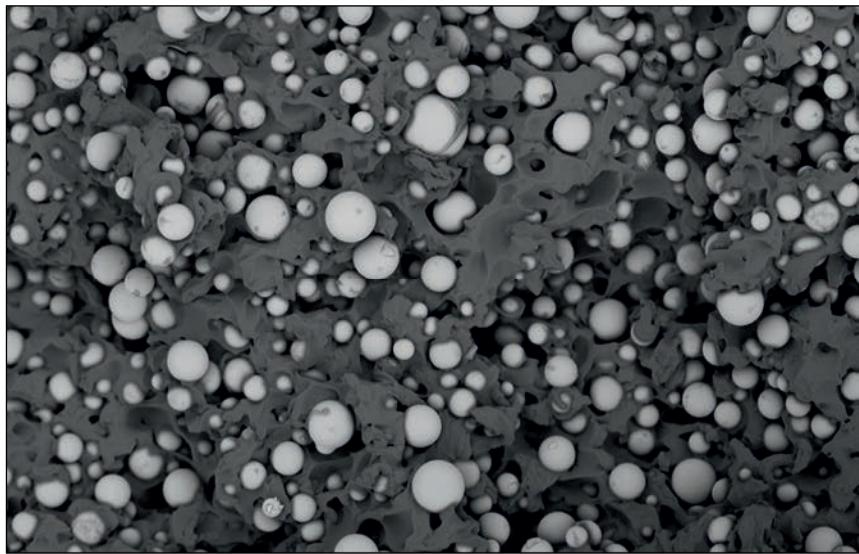


Fig. 1: REM images of the 3M glass bubbles in the TPE matrix

3. Outstanding material properties of lightweight TPE

The density of lightweight TPEs can be flexibly adjusted from 0.9 to 0.7 g/cm³. This means that, for example, weight savings of around 30% compared to TPV and up to 50% compared to PVC can be achieved.

Also outstanding are the compression set (see Fig. 2) and the fast recovery according to PV3307 (5 seconds) of lightweight TPEs, which is at the level of EPDM and thus expands the range of applications for TPE materials. A corresponding comparison with regard to the compression set of the various materials can be found in Fig. 2, whereby TL6OCW-BLCK is a lightweight TPE and TC6CSZ and TP6LDZ are TPEs already established in the automotive market.

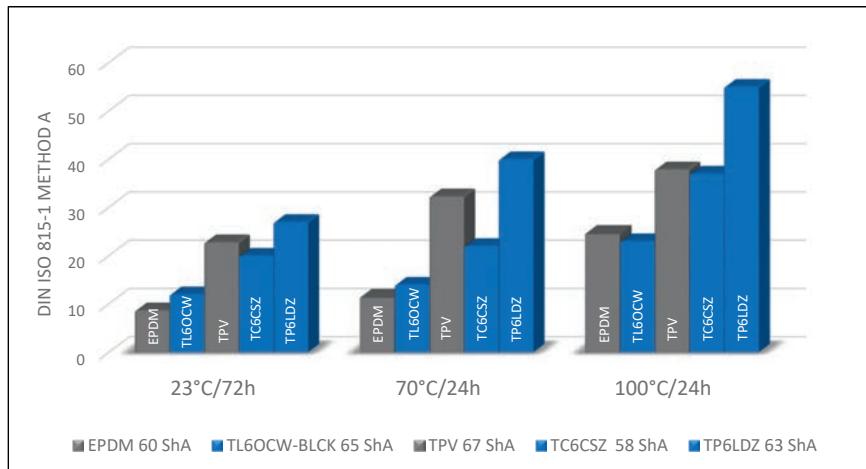


Fig. 2: Comparison of the compression set in % according to DIN ISO 815-1 Method A

Furthermore, these materials offer very good UV resistance, so that they can also be used in the vehicle exterior. For this purpose, the materials are artificially weathered according to PV3930 (Florida) and PV3929 (Kalahari) after which the surface and the color change is evaluated. Here the lightweight TPEs show no surface cracks and have a gray scale of greater than or equal to 4.

4. Processing advantages of lightweight TPE

In addition to the outstanding material properties that come into play during use, lightweight TPEs also offer advantages in processing, for example in injection molding.

On the one hand, processing shrinkage is very low. In addition to wall thickness, possible orientations in the component and cooling conditions during production, this also depends on the material used. Compared to established TPEs with shrinkage values of ~1.0%, isotropic shrinkage values of up to ~0.2% can be achieved with lightweight TPEs, to take the example of a roof rail mat. Distortion in complex components or overmolded fabrics can thus also be avoided. Due to the relatively low thermal expansion of lightweight TPEs, dimensional stability over a wide temperature range can also be ensured.

On the other hand, the reduced thermal capacity of lightweight TPEs leads to faster cooling in the injection mold. On a sample plate 2mm thick, the temperature difference between

lightweight TPE and standard TPE for the same cooling time is over 20°C. This offers possibilities for reducing cooling time and thus cycle time, which has a significant influence on economic production.

Due to excellent possibilities for adhesion to PP, PA and TPV, a wide range of material combinations can also be realized. These innovative TPEs can be processed economically on the usual systems in the injection-molding and extrusion process to create a variety of multi-component parts.

5. Possible applications and potentials of lightweight TPE

The automotive sector offers the greatest potential for savings in the exterior area: up to 4kg per vehicle can be achieved. A maximum weight reduction is gained in applications in the door and window areas, such as window guides, window overmoldings and door seals (Fig. 3). Due to low compression sets, lightweight TPEs also offer technical application advantages in sealing performance. For this reason, in the overall sealing system concept lightweight TPEs offer an innovative alternative with various unique selling points.

Even if the overall savings potential in the interior area is lower, large-area components such as floor and shelf mats in particular are of great interest for possible weight reductions. Technical advantages such as the low distortion and shrinkage behavior are particularly relevant for these applications in addition to weight reduction. Fan flaps and interior duct strips can also benefit from the use of the material (Fig. 4).

The powertrain area also offers great scope for savings: in addition to grommets, battery systems and hood seals, there are various air duct components, underbody components and even CW seals that can benefit from the use of lightweight TPE and thus lead to further weight savings (Fig. 5).

If the entire savings potential in the interior, exterior and powertrain is taken into account, a weight saving of around 6kg per vehicle can be achieved by the use of lightweight TPE – and without any significant loss of performance. What may sound like a dream of the future in this context may soon become a reality: especially when lightweight design possibilities using metals are exhausted in the body area, this potential will gain in importance and establish itself as a true alternative.

Application	Current Material	Number of components	Total weight	Savings potential	
Water deflector	TPE	2x	200 g	30 %	60 g
Cowl	TPE	1x	200 g	30 %	60 g
Glass run channel	EPDM	4x	2800 g	40 %	1120 g
Door Sealing on body	EPDM	4x	2000 g	40 %	800 g
Door Sealing on door	EPDM	4x	2000 g	40 %	800 g
Trunk sealing	EPDM	1x	1000 g	40 %	400 g
Door gap sealing	TPE	6x	200 g	30 %	60 g
Window encapsulation	TPE	4x	800 g	30 %	240 g
Door sill	TPE	4x	150 g	30 %	45 g
					- 3585 g

Fig. 3: Potential savings in the exterior area

Application	Current Material	Number of components	Total weight	Savings potential	
Anti slip mat	TPE	6 x	600 g	30 %	180 g
Floor mat	TPE	4 x	4000 g	30 %	1200 g
HVAC flaps	TPE	10 x	300 g	30 %	90 g
Inner belt	TPE	4 x	500 g	30 %	150 g
					- 1620 g

Fig. 4: Potential savings in the interior area

Application	Current Material	Number of components	Total weight	Savings potential	
Active grill shutter	TPE	1 x	500 g	30 %	150 g
Engine cover sealing	EPDM	4 x	850 g	40 %	340 g
Grommets	TPE	10 x	500 g	30 %	150 g
Battery system	TPE	1 x	1000 g	30 %	300 g
					- 940 g

Fig. 5: Potential savings in the powertrain area

6. Summary and outlook

The demands for weight savings will not diminish in the future either. In the field of existing and new forms of mobility, for example, there are numerous options for reducing CO₂ emissions from vehicle fleets, lowering the fuel consumption of combustion engines and increasing the range of electric vehicles.

In addition to this trend, sustainability is also becoming increasingly important. To this end, raw materials from recycling sources are used. On the other hand, the materials used should also be in-process recyclable and be able to be fed back into the production process. This is where TPEs in particular show their advantage of thermoplastic processability as compared to elastomers. With lightweight TPEs it is also possible to reuse rejects and runners on scales usual in industry. Fig. 6 shows the result of a corresponding investigation using 100% ground material.

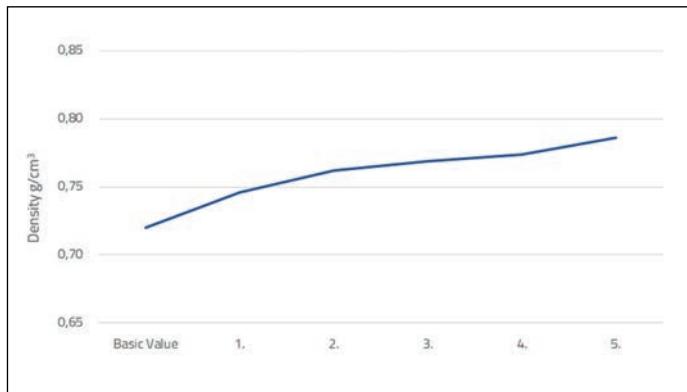


Fig. 6: Development of density in g/cm^3 with 100% reuse over the number of grinding operations

What is also special about the new lightweight TPE is that it enables components to be made with significantly less material, thus contributing to a consistent increase in resource efficiency. With these sustainable material properties, the new material class supports the environmental awareness of OEMs, processors and suppliers.

In the automotive industry in particular, the development of alternative drive systems means that new requirements are always being laid on the materials of the future. The market is in a state of upheaval and it is therefore important to observe the trends and provide responses in the form of new materials and solutions. With its lightweight TPEs, KRAIBURG TPE is now meeting the ever-increasing demands for lightweight construction. These materials form the basis for future developments that can be tailored specifically to the wishes and needs of our customers.

7. References

- [1] Baur, E., Brinkmann, S., Osswald, T., Schmachtenberg, E. (2007): Saechting, Kunststoff Taschenbuch [Plastics Handbook], 30th ed., 964 pages, Munich, Carl Hanser Verlag.
- [2] Weniger Gewicht für mehr Leistung [Less weight for more performance], brochure, 3M Deutschland GmbH, Neuss 2016
- [3] Weniger Aufwand für mehr Möglichkeiten [Less effort for more options], brochure, 3M Deutschland GmbH, Neuss 2016

Lightweight TPE für gewichtsreduzierte Automobilanwendungen

BE SMART – MAKE IT LIGHTWEIGHT

Dipl.-Ing. (FH) **Martina Hetterich, Matthias Michl**,
KRAIBURG TPE GmbH & Co. KG, Waldkraiburg

Kurzfassung

Speziell im Automobilsektor führen Gewichtseinsparungen zu vielen Vorteilen, weshalb KRAIBURG TPE in Kooperation mit 3M™ Materialien entwickelt hat, um dem Bedarf an Leichtbaulösungen nachzukommen. Lightweight TPE profitieren von Materialeigenschaften wie Haftung und Verarbeitbarkeit im Spritzgieß- und Extrusionsprozess zu Mehrkomponentenbauteilen sowie sehr guten Dichtungseigenschaften. Bislang einzigartig auf dem Markt ist die Materiallösung aufgrund ihrer Dichte von bis zu 0,7 g/cm³ als Vollmaterial ohne Verwendung jeglicher Sonderverfahren und Schäumprozesse – das entspricht einer Einsparung von über 25 Prozent zum nächstleichteren TPE. Um dem Nachhaltigkeitsgedanken Rechnung zu tragen, lassen sich TPE in den Produktionsprozess zurückführen und sind somit in-process-recyclingfähig. Auch wird weniger Material benötigt, was zu einem effizienteren Umgang mit den benötigten Ressourcen führt und der Umweltgedanke der OEMs, Verarbeiter und Zulieferer wird unterstützt. Die spezielle Oberflächenbeschaffenheit in Verbindung mit UV-Beständigkeit ermöglicht zudem den Einsatz der neuartigen Materialien speziell für Anwendungen im Außeneinsatz und hoher Verbaulage. Lightweight TPE werden in drei spezifischen Typenreihen angeboten, können jedoch den Anforderungen und Ideen stark angepasst werden – Bauteilhersteller, -Produzenten sowie OEMs und deren Entwickler sind dazu eingeladen, bestehende Produktideen neu zu denken.

1. Einführung in den Stand der Technik und Innovationstreiber

Aufgrund ihrer Materialeigenschaften, den vielseitigen Einsatzmöglichkeiten und der wirtschaftlichen Verarbeitbarkeit haben Thermoplastische Elastomere (TPE) seit den 90er Jahren des 20. Jahrhunderts eine rasante Entwicklung erfahren. Dies zeigt sich in einer Vielzahl von Anwendungen, hierzu zählen im Automobilmarkt die Verwendung sowohl im Exterieur, im Interieur als auch im Powertrain.

Neben TPE auf Basis von Polyurethan (TPU), Styrol-Block-Copolymer (TPS) und vernetztem Kautschuk (TPV) sind auch Polyvinylchlorid (PVC) und thermisch irreversibel vernetzte Elastomere wie zum Beispiel Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (EPDM) in entsprechenden Anwendungen im Einsatz. Gemeinsam sind diesen Materialien in erster Linie ihre elastischen Eigenschaften und eine Härte im Shore-A-Bereich. Einen Überblick über die verschiedenen weichen Materialien und deren typischen Dichten zeigt die Tabelle 1.

Tabelle 1: Weiche Materialklassen und typische Dichten

Material	Typische Dichte in g/cm ³
PVC	1,3 ... 1,5
EPDM	1,1 ... 1,3
TPU	1,1 ... 1,3
TPS	0,9 ... 1,2
TPV	0,9 ... 1,1

Eine Reduktion der Dichte und somit Gewichtseinsparung am Bauteil war in der Vergangenheit lediglich durch Schäumen möglich.

Unterschieden wird zwischen dem chemischen und physikalischen Schäumen. Beim chemischen Schäumen entsteht das Treibmittel durch chemischen Zerfall eines Zuschlagstoffes. Beim physikalischen Schäumen wird das Treibfluid in der Schmelze gelöst und schäumt bei Druckabfall oder Temperaturanstieg auf.

Chemische Treibmittel sind häufig Feststoffe, die bei höheren Temperaturen unter Freisetzung von Gasen zerfallen. Sie müssen sehr gleichmäßig im Substrat verteilt sein und ihre Zersetzungstemperatur muss mit der Verarbeitungstemperatur des Polymeren korrespondieren.

Eine Möglichkeit des physikalischen Schäumens ist das Verdampfen der in die Formassen eingearbeiteten, relativ niedrig siedenden Substanzen wie Monomere oder Lösemittel. Wegen der erkannten schlechten Umweltverträglichkeit werden viele dieser Stoffe heute nicht mehr zum Schäumen verwendet. Wenn die Schmelze zu langsam eingespritzt wird, schäumt sie schon während der Formfüllung auf und es entstehen Schlieren an der Formteilloberfläche.

Alternativ wird das Verfahren des Schaumspritzgießens mit physikalischen Treibmitteln verwendet, z. B. MuCellTM oder OptifoamTM, bei welchen CO₂ oder N₂ als Treibgas verwendet werden. Mit physikalischen Treibmitteln sind prinzipiell höhere Aufschäumgrade im Vergleich zu chemischen Treibmitteln erzielbar. Das Schäumen mit CO₂ oder N₂ ist als

umweltfreundlicher einzustufen wie die Verwendung niedrig siedender Kohlenwasserstoffe. Der Aufwand für die Maschine und die Prozessführung ist jedoch wesentlich höher. [1]

Aufgrund all dieser Limitierungen hat es sich KRAIBURG TPE zur Aufgabe gesetzt, Materialien zu entwickeln, die niedrigere Dichten aufweisen und somit eine Gewichtseinsparung ermöglichen, ohne auf Schäum-Verfahren zurückgreifen zu müssen.

2. Kooperation zur Materialentwicklung – 3M und KRAIBURG TPE

Als geeigneter Füllstoff für die Entwicklung von Lightweight TPE haben sich die Glashohlkugeln 3M™ Glass Bubbles erwiesen.

3M Glass Bubbles sind mikroskopisch kleine Glashohlkugeln aus wasserunlöslichem, chemisch stabilem Borosilikatglas, die über eine niedrige Dichte verfügen. Jede Glashohlkugel zeichnet sich durch ihre perfekte Kugelform aus. Die unterschiedlichen Partikelgrößen der einzelnen 3M Glass Bubbles sorgen für eine optimale Packungsdichte im Vergleich zu unregelmäßig geformten mineralischen Füllstoffen. Das Sortiment deckt durchschnittliche Nenndichten von 0,125 bis 0,60 g/cm³ bei isostatischen Druckfestigkeiten von 17 bis 2.000 bar ab. [2]

Um 3M Glass Bubbles schonend in eine Polymerschmelze einzuarbeiten, empfiehlt sich der Einsatz eines Doppelschneckenextruders oder eines BUSS-Kneters mit einer Seitenstopfeinheit, die im letzten Schneckendrittel vor der Schnekkenspitze angebracht sein sollte. Die Schneckengänge des Extruders müssen nach dem Einbringen der 3M Glass Bubbles auf ein Mindestmaß an Scherbelastung eingestellt werden. Vorzugsweise sind distributive Mischelemente einzusetzen. Aggressive, disperse Mischelemente wie rückfördernde Elemente und Knetblöcke sind nicht empfehlenswert.

Um den Bruch der 3M Glass Bubbles auf ein Minimum zu beschränken, sollte die Zufuhr der Glashohlkugeln erst an der Stelle im Extruder erfolgen, an der das Polymer vollständig geschmolzen ist. Am gleichmäßigsten lässt sich die Zufuhr durch eine Seitenstopfeinheit mit Schneckenantrieb erzielen. Außerdem empfiehlt es sich, die Geschwindigkeit der Extruderschnecke und den Druck im Extruder möglichst gering zu halten. [3]

Neben dem optimalen Produktionsequipment hinsichtlich Dosierung und Compoundierung stellte die Rezeptierung eine Herausforderung in der Entwicklung der Lightweight TPE dar, um eine hohe Überlebensrate, eine gleichmäßige Verteilung und eine gute Einbindung der 3M Glass Bubbles in die Matrix sicherzustellen. Gemeinsam konnten 3M und KRAIBURG TPE die

optimale Glashohlkugel aus dem Portfolio selektieren, die stabil genug für die thermoplastischen Verarbeitungsprozesse ist, aber weiterhin leicht genug, um signifikant das Gewicht der Materialien zu reduzieren.

Durch gute Zusammenarbeit zwischen 3M und KRAIBURG TPE konnte dies erfolgreich umgesetzt werden und resultiert in der Markteinführung der Lightweight TPE. Die mit Hilfe von Veraschung und anschließender Dichtemessung bestimmte Überlebensrate von über 95 % kann auch mittels REM Aufnahmen bestätigt werden, siehe Bild 1.

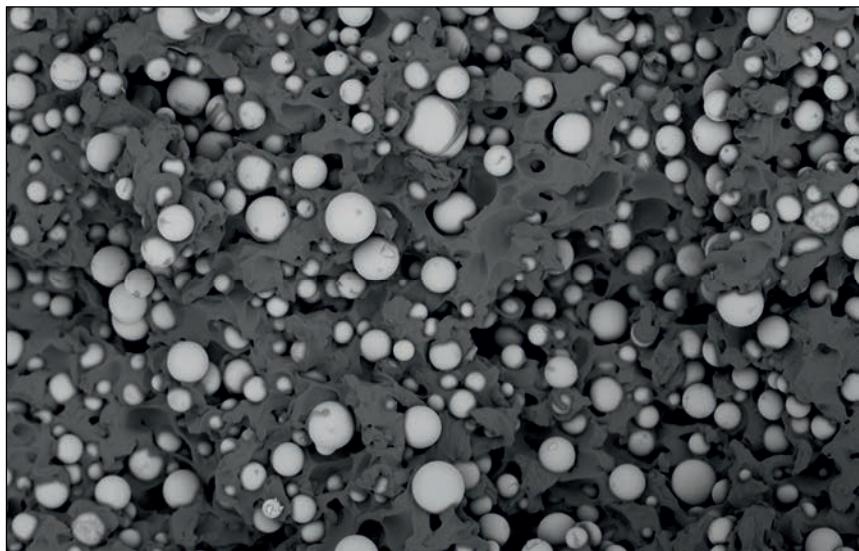


Bild 1: REM-Aufnahmen der 3M Glass Bubbles in TPE Matrix

3. Herausragende Materialeigenschaften von Lightweight TPE

Die Dichte der Lightweight TPE ist flexibel von 0,9 bis 0,7 g/cm³ einstellbar. Somit sind beispielsweise Gewichtseinsparungen von rund 30 % gegenüber TPV und bis zu 50 % im Vergleich zu PVC realisierbar.

Herausragend sind zudem der Druckverformungsrest (siehe Bild 2) und das schnelle Rückstellverhalten nach PV3307 (5 Sekunden) der Lightweight TPE, das auf dem Niveau von EPDM liegt und somit das Anwendungsspektrum von TPE Materialien erweitert. Ein

entsprechender Vergleich hinsichtlich des Druckverformungsrests der verschiedenen Materialien ist Bild 2 zu entnehmen, wobei es sich bei TL6OCW-BLCK um ein Lightweight TPE handelt und bei TC6CSZ und TP6LDZ um bereits im Automobilmarkt etablierte TPE.

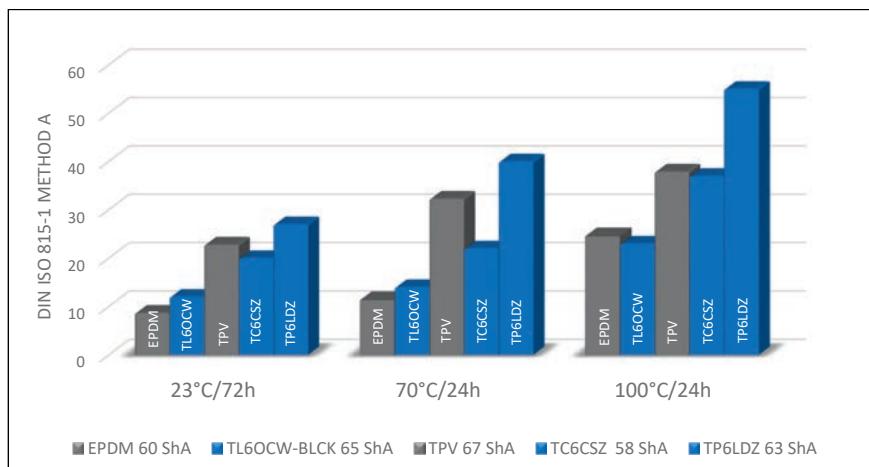


Bild 2: Vergleich des Druckverformungsrests in % gemäß DIN ISO 815-1 Methode A

Des Weiteren bieten die Materialien sehr gute UV-Beständigkeit, sodass sie auch im Exterieur zum Einsatz kommen können. Hierfür werden die Materialien gemäß PV3930 (Florida) und PV3929 (Kalahari) künstlich bewittert und anschließend eine Bewertung der Oberfläche sowie der Farbänderung durchgeführt. Die Lightweight TPE zeigen hier keine Risse an der Oberfläche sowie einen Graumaßstab von größer gleich 4.

4. Verarbeitungsvorteile von Lightweight TPE

Neben den herausragenden Materialeigenschaften, die während des Einsatzes zum Tragen kommen, bieten Lightweight TPE auch Vorteile bei der Verarbeitung, beispielsweise im Spritzguss.

Zum einen ist die Verarbeitungsschwindung sehr gering. Diese ist neben der Wanddicke, möglichen Orientierungen im Bauteil und den Abkühlverhältnissen bei der Herstellung auch vom verwendeten Material abhängig. Gegenüber etablierten TPE mit Schwindungswerten von ~ 1,0 % können mit Lightweight TPE isotrope Schwindungswerte von bis zu ~ 0,2 % am

Beispiel einer Dachreling Matte erreicht werden. Somit kann auch Verzug an komplexen Bauteilen oder umspritzten Geweben vermieden werden. Aufgrund der relativ geringen thermischen Ausdehnung der Lightweight TPE kann zudem die Dimensionsstabilität über einen großen Temperaturbereich sichergestellt werden.

Zum anderen führt die reduzierte Wärmekapazität der Lightweight TPE zu einer schnelleren Abkühlung im Spritzgusswerkzeug. An einer 2 mm dicken Musterplatte beträgt die Temperaturdifferenz von Lightweight TPE zu Standard TPE bei gleicher Kühlzeit über 20 °C. Somit bieten sich Möglichkeiten der Kühlzeit- und somit Zykluszeit-Reduktion, was maßgeblichen Einfluss auf eine wirtschaftliche Fertigung hat.

Aufgrund ausgezeichneter Haftungsmöglichkeiten zu PP, PA sowie zu TPV lassen sich darüber hinaus eine große Bandbreite an Materialkombinationen realisieren. Die innovativen TPE können dabei auf gängigen Anlagen wirtschaftlich im Spritzgieß- und Extrusionsprozess zu vielfältigen Mehrkomponentenbauteilen verarbeitet werden.

5. Einsatzmöglichkeiten und Potenziale von Lightweight TPE

Das größte Potenzial für Einsparungen bietet der Automobilsektor im Bereich Exterieur: Bis zu 4 kg pro Fahrzeug können gewonnen werden. Eine maximale Gewichtsreduzierung wird bei Anwendungen im Tür- und Fensterbereich erzielt, wie zum Beispiel im Fall der Fensterführungen, bei Scheibenumspritzungen und Türdichtungen (Bild 3). Aufgrund der niedrigen Druckverformungsreste bieten Lightweight TPE darüber hinaus auch technische Anwendungsvorteile in der Dichtperformance. Aus diesem Grund offerieren Lightweight TPE im Gesamtkonzept Dichtungssystem eine innovative Alternative mit diversen Alleinstellungsmerkmalen.

Auch wenn im Bereich Interieur das gesamte Einsparpotenzial geringer ist, sind insbesondere großflächige Bauteile wie Fuß- und Ablagematten von hohem Interesse für mögliche Gewichtsreduktionen. Technische Vorteile wie das geringe Verzugs- und Schwindungsverhalten sind neben der Reduzierung des Gewichts für diese Anwendungen besonders relevant. Auch Lüfterklappen und innere Schachtleisten können vom Einsatz des Materials profitieren (Bild 4).

Der Bereich Powertrain bietet ebenfalls großen Spielraum für Einsparungen: Neben Tüllen, Batteriesystemen und Abdichtungen der Motorhaube existieren diverse Luftführungsbauteile,

Unterbodenbauteile und auch CW-Dichtungen, die von der Verwendung von Lightweight TPE profitieren können, und so zu weiteren Gewichtsersparnissen führen (Bild 5).

Berücksichtigt man das gesamte Einsparpotential im Interior Exterieur und Powertrain, kann unter Verwendung von Lightweight TPE eine Gewichtseinsparung von etwa 6 kg pro Fahrzeug erreicht werden – ohne ausschlaggebende Performanceeinbuße. Was in diesem Zusammenhang noch wie Zukunftsmusik klingen mag, kann bald zur Realität werden: Insbesondere wenn die Leichtbau-Möglichkeiten mit Metallen im Bereich der Karosserie ausgeschöpft sind, wird dieses Potenzial an Bedeutung gewinnen und sich als wahre Alternative etablieren.

Anwendung	Aktueller Werkstoff	Anzahl Bauteile	Gesamtgewicht	Einsparpotenzial	
Wasserfangleiste	TPE	2x	200 g	30 %	60 g
Wasserkasten	TPE	1x	200 g	30 %	60 g
Glass run channel	EPDM	4x	2800 g	40 %	1120 g
Dichtung an Tür	EPDM	4x	2000 g	40 %	800 g
Dichtung an Karosserie	EPDM	4x	2000 g	40 %	800 g
Kofferraumdichtung	EPDM	1x	1000 g	40 %	400 g
Spaltabdeckung	TPE	6x	200 g	30 %	60 g
Scheibenumspritzung	TPE	4x	800 g	30 %	240 g
Untere Spaltabdeckung	TPE	4x	150 g	30 %	45 g
					- 3585 g

Bild 3: Einsparpotenziale im Bereich Exterieur

Anwendung	Aktueller Werkstoff	Anzahl Bauteile	Gesamtgewicht	Einsparpotenzial	
Ablagematte	TPE	6 x	600 g	30 %	180 g
Fußmatte	TPE	4 x	4000 g	30 %	1200 g
Lüfterklappen	TPE	10 x	300 g	30 %	90 g
Innere Schachtleiste	TPE	4 x	500 g	30 %	150 g
					- 1620 g

Bild 4: Einsparpotenziale im Bereich Interieur

Anwendung	Aktueller Werkstoff	Anzahl Bauteile	Gesamtgewicht	Einsparpotenzial	
Active Grill Shutter	TPE	1 x	500 g	30 %	150 g
Abdichtung Motorhaube	EPDM	4 x	850 g	40 %	340 g
Tüllen	TPE	10 x	500 g	30 %	150 g
Batteriesystem	TPE	1 x	1000 g	30 %	300 g
					- 940 g

Bild 5: Einsparpotenziale im Bereich Powertrain

6. Zusammenfassung und Ausblick

Die Forderungen nach Gewichtseinsparung werden auch zukünftig nicht abreißen. So bieten sich beispielsweise im Bereich bestehender sowie neuer Mobilitätsformen zahlreiche Möglichkeiten, die CO₂-Emissionen von Fahrzeugflotten zu reduzieren, den Kraftstoffverbrauch von Verbrennern zu senken und die Reichweite von Elektrofahrzeugen zu erhöhen.

Neben diesem Trend nimmt auch das Thema Nachhaltigkeit einen immer größeren Stellenwert ein. Hierzu wird zum einen auf Rohstoffe aus Recycling-Quellen zurückgegriffen. Zum anderen sollen auch die verwendeten Materialien in-process-recyclingfähig sein und sich in den Produktionsprozess zurückführen lassen. Hier spielen vor allem TPE ihren Vorteil der thermoplastischen Verarbeitbarkeit gegenüber Elastomeren aus. Auch mit den Lightweight TPE ist die Wiederverwendung von Ausschuss und Angussverteilern in industrieüblichen Maßstäben möglich. In Bild 6 ist das Ergebnis einer entsprechenden Untersuchung mit Verwendung von 100 % gemahlenem Material dargestellt.

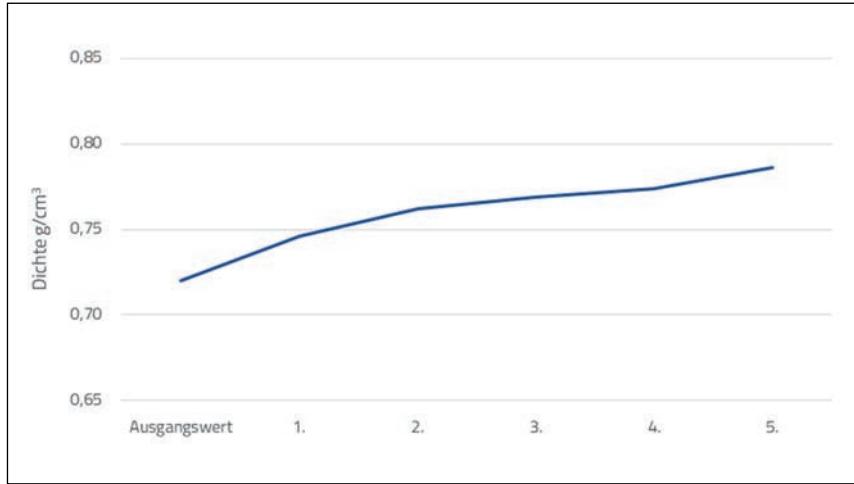


Bild 6: Entwicklung der Dichte in g/cm³ bei 100 % Wiederverwendung über die Anzahl der Mahlvorgänge

Das Besondere der neuen Lightweight TPE ist zudem, dass Bauteile mit deutlich weniger Materialeinsatz ermöglicht werden und somit zur konsequenten Steigerung der Ressourceneffizienz beigetragen werden kann. Mit diesen nachhaltigen Materialeigenschaften unterstützt die neue Materialklasse den Umweltgedanken von OEMs, Verarbeitern und Zulieferern.

Insbesondere in der Automobilindustrie werden aufgrund der Entwicklung alternativer Antriebssysteme immer neue Anforderungen an die Materialien der Zukunft gestellt. Der Markt befindet sich im Umbruch und daher gilt es die Trends zu beobachten und Antworten in Form neuer Materialien und Lösungen zu bieten. Den immer stärker werdenden Forderungen nach

Leichtbau wird KRAIBURG TPE nun mit seinen Lightweight TPE gerecht. Diese Materialien stellen die Basis für zukünftige Entwicklungen, die speziell auf die Wünsche und Bedürfnisse unserer Kunden maßgeschneidert werden können.

7. Literaturangaben

- [1] Baur, E., Brinkmann, S., Osswald, T., Schmachtenberg, E. (2007): Saechtling Kunststoff Taschenbuch.- 30. Ausgabe: 964 S., München, Carl Hanser Verlag.
- [2] Weniger Gewicht für mehr Leistung, Broschüre, 3M Deutschland GmbH, Neuss 2016
- [3] Weniger Aufwand für mehr Möglichkeiten, Broschüre, 3M Deutschland GmbH, Neuss 2016

Sustainability: R-cycle and digital twin

An approach to a sustainable circular economy

Dr.-Ing. Thomas Walther, ARBURG GmbH + Co. KG, Loßburg;
Dr.-Ing. Benedikt Brenken, Reifenhäuser Group, Troisdorf

Abstract

Looking at today's waste streams, it is evident that only a small proportion of recyclable plastic waste is processed into high-quality recyclate. The high diversity of plastics makes the waste stream difficult to sort, which leads to low-quality mixed plastics after processing. With the introduction of a digital product passport, information relevant to recycling is recorded during the manufacture of plastic products. These data are then available digitally for the recycling process in the subsequent cycle. They make a finer sorting possible, which ultimately leads to higher quality recyclates.

1. The problem of material recycling

In present-day waste management, even fully recyclable packaging usually ends up in landfills, is incinerated or – in the worst case – ends up in the environment. Only a small percentage of plastic waste is processed into recyclate and thus returned to the plastics cycle. In most cases it is rather a downcycling which takes place here. Due to the mixing of different types of plastic, the recyclate from today's waste streams can only be used in very simple applications, such as thick-walled injection-molded parts or, at best, black garbage bags. These applications then rule out all further recycling loops, although a batch of single-type plastic could certainly be recycled several times.

2. The R-cycle concept The digital product passport as a possible solution

Behind the R-Cycle joint project lies a cross-sector consortium of technology companies, institutes and organizations from the plastics and recycling industries.

R-Cycle is working on an open and globally applicable traceability standard for sustainable plastic products. By providing a digital product passport, R-Cycle makes possible a genuine circular economy and highly efficient value chains. All process partners along the cycle are integrated into the cross-industry standard – from packaging manufacturer to processor to the recycling industry.

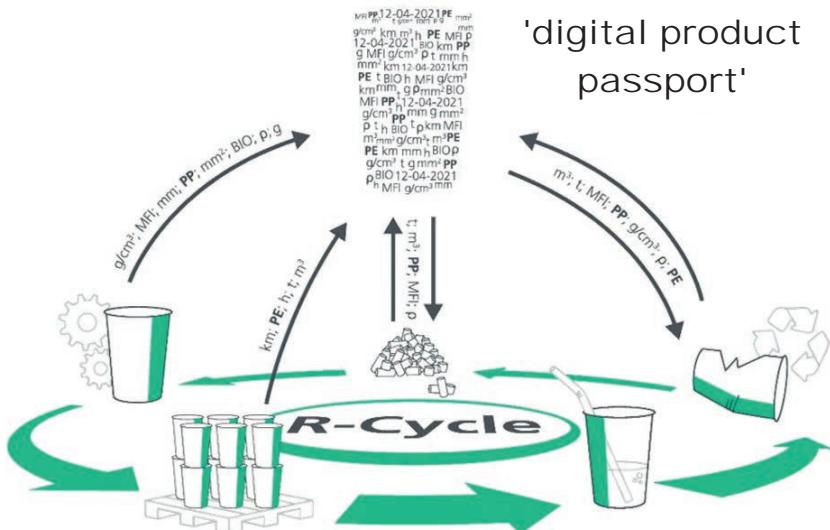


Fig. 1: Digital product passport for sustainable recycling management

Two essential basic requirements are required for high-quality recycling: fully recyclable packaging and highly-developed recycling processes. The first requirement has already been met. There are various recyclable packaging solutions, such as mono-material composites, which are supplemented by recycling-friendly printing inks, adhesives and additives.

For the second requirement to be satisfied, present-day waste streams must be examined. Today even fully recyclable packaging is often not separated out precisely enough for high-quality recycling. In Germany, for example, only about 6% of plastics from household waste is recycled as so-called post-consumer recyclate (PCR) for equivalent new products. The largest share of over 65% is thermally recycled [1].

The R-Cycle concept therefore includes the creation of a gapless documentation of recyclable products along the value chain with the aim of having detailed information about the composition of the products at the time of sorting, thereby enabling a sorting into individual material types.

3. Benefits of standards

R-Cycle can be networked with any production plant: from injection-molding or film machines to processing, printing and filling machines to waste-sorting and recycling plants. The

traceability technology behind R-Cycle is based on GS1 standards – the leading global network for cross-industry process development and a founding member of the R-Cycle consortium. The underlying technology, the so-called EPCIS standard, is already being used successfully in various industries worldwide, e.g. for the traceability of fresh food products.

4. Pilot project: 'Reusable cups with digital product passport'

The R-Cycle concept is being tested and validated in numerous pilot projects. In one pilot project, Arburg has designed a smart turnkey system that can generate and communicate digital product passports fully automatically. Reusable cups with digitally printed data are, for example, produced in an appealing design.

The heart of the production cell is an electric Allrounder 370A with a clamping force of 600 kN and Gestica control system. This injection-molding machine is 'digitalization-ready' as standard, i.e. it is equipped with an IIOT interface, which offers extensive possibilities for communication and data exchange. On this basis, the connection to and communication with the R-Cycle data infrastructure is realized. The information required for the digital product passport is collected or generated during production. The corresponding data are extracted from the machine or order data, prepared according to the EPCIS definition and communicated as an event to the R-Cycle server.



Fig. 2: Arburg turnkey system for sustainable reusable cups

The manufactured cups are removed from the mold using a vertical robot system, fed first to a plasma treatment and then to a digital printing station. Product refinement is thus integrated directly into the production cell. Each cup is printed with a selectable image motif. In addition, two DM codes are printed inside the print image, one of which leads to the digital product passport on an order-related basis.



By reading the code, either via a camera system incorporated directly in a sorting system or with a mobile device, the exact material data of the cup can be identified. With this concept, a more precise sorting of plastic waste is made possible.

Fig. 3: Reusable cups with identification options

5. Expandable data concept

Another application case in which the digital product passport can provide added value is the fulfillment of (upcoming) statutory information obligations, such as in calculation of the CO₂ footprint or in the field of Extended Producer Responsibility (EPR). In this way, time-consuming manual calculations can be automated in order to meet legal or customer requirements.

6. Summary

With the R-Cycle concept, a digital product passport is generated for consumer products. All relevant information from the value chain is made transparently and automatically usable for all those involved in the process, with the aim of enabling the use of this information to generate high-quality recyclate in the recycling process and returning it to the value chain. A pilot project – a reusable cup produced on an Arburg turnkey system – shows the feasibility of this concept. This increases sustainability and efficiency, both in the procurement of information and also in the entire cycle of plastic packaging and plastic products.

[1] *Conversio Studie 2017 (Stoffstromdiagramm Kunststoffe in Deutschland [material flow diagram - plastics in Germany]) / Plastikatlas, Heinrich Böll Stiftung

Nachhaltigkeit: R-Cycle und digitaler Zwilling

Lösungsansatz für eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft

Dr.-Ing. Thomas Walther, ARBURG GmbH + Co. KG, Loßburg;
Dr.-Ing. Benedikt Brenken, Reifenhäuser Group, Troisdorf

Kurzfassung

Betrachtet man die heutigen Abfallströme, so wird nur ein geringer Anteil recycelbaren Kunststoffabfalls zu hochwertigem Rezyklat verarbeitet. Die hohe Diversität der Kunststoffe im Abfallstrom lässt sich nur schwer sortieren, was bei einer Aufbereitung zu minderwertigen Mischkunststoffen führt.

Mit der Einführung eines digitalen Produktpasses werden bei der Herstellung von Kunststoffprodukten die recyclingrelevanten Informationen erfasst. Diese Daten stehen im späteren Kreislauf für den Recyclingprozess digital zur Verfügung. Sie ermöglichen eine detailliertere Sortierung, die letztendlich zu hochwertigeren Rezyklaten führt.

1. Problematik stoffliches Recycling

In der heutigen Abfallwirtschaft landen selbst vollständig recycelbare Verpackungen in der Regel auf Mülldeponien, werden verbrannt oder gelangen – im schlimmsten Fall – in die Umwelt. Nur ein geringer Prozentsatz des Kunststoffabfalls wird zu Rezyklat verarbeitet und damit wieder dem Kunststoffkreislauf zurückgeführt. Bei diesem Anteil findet genauer betrachtet zumeist ein Downcycling statt. Aufgrund der Vermischung verschiedener Kunststoffarten kann das Rezyklat aus heutigen Abfallströmen nur in sehr einfachen Anwendungen eingesetzt werden, wie z. B. für dickwandige Spritzgussteile oder bestenfalls schwarze Müllsäcke. Diese Anwendungen lassen dann keine weiteren Recyclingkreisläufe zu, obwohl eine sortenreine Kunststoffcharge durchaus mehrfach recycelt werden könnte.

2. R-Cycle Konzept. Digitaler Produktpass als Lösungsansatz

Hinter dem Verbundprojekt R-Cycle verbirgt sich ein branchenübergreifendes Konsortium aus Technologieunternehmen, Instituten und Organisationen aus der Kunststoff- und Recyclingindustrie.

R-Cycle arbeitet an einem offenen und weltweit anwendbaren Rückverfolgungsstandard für nachhaltige Kunststoffprodukte. Durch die Bereitstellung eines digitalen Produktpasses ermöglicht R-Cycle eine echte Kreislaufwirtschaft und hocheffiziente Wertschöpfungsketten.

In den branchenübergreifenden Standard werden alle Prozesspartner entlang des Kreislaufs eingebunden – vom Verpackungshersteller über den Verarbeiter bis hin zur Recyclingindustrie.

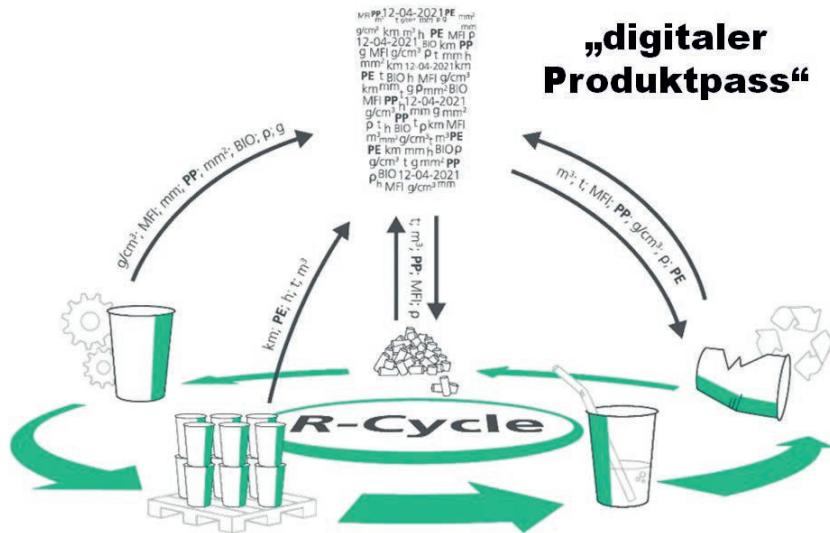


Bild 1: Digitaler Produktpass für nachhaltige Kreislaufwirtschaft

Um ein hochwertiges Recycling zu ermöglichen, sind zwei wesentliche Grundvoraussetzungen erforderlich: vollständig recycelbare Verpackungen und hochentwickelte Recyclingprozesse. Die erste Voraussetzung ist bereits vorhanden. Es gibt verschiedene recycelbare Verpackungslösungen, wie z. B. Monomaterialverbunde, die durch recyclingfreundliche Druckfarben, Klebstoffe und Additive ergänzt werden.

Um die zweite Voraussetzung zu erfüllen, müssen die heutigen Abfallströme betrachtet werden. Selbst voll recycelbare Verpackungen werden heute oft nicht präzise genug für ein hochwertiges Recycling getrennt. So werden beispielsweise in Deutschland nur etwa sechs Prozent der Kunststoffe aus dem Hausmüll als sogenanntes Post-Consumer-Rezyklat (PCR) für gleichwertige neue Produkte wiederverwertet. Der größte Anteil von über 65 Prozent wird thermisch verwertet [1].

Das Konzept von R-Cycle beinhaltet daher das Schaffen einer lückenlosen Dokumentation von recycelbaren Produkten entlang der Wertschöpfungskette mit dem Ziel, zum Zeitpunkt der

Sortierung die detaillierten Informationen über die Zusammensetzung der Produkte zu haben, die eine sortenreine Sortierung erlauben.

3. Nutzen von Standards

R-Cycle ist mit jeder Produktionsanlage vernetzbar: von Spritzgieß- oder Folienmaschinen über Verarbeitungs-, Druck- und Abfüllmaschinen bis hin zu Abfallsortier- und Recycling-Anlagen. Die Rückverfolgungstechnologie hinter R-Cycle basiert auf GS1-Standards – dem führenden globalen Netzwerk für branchenübergreifende Prozessentwicklung und Gründungsmitglied des R-Cycle Konsortiums. Die zugrundeliegende Technologie, der so genannte EPCIS-Standard, wird bereits in verschiedenen Branchen weltweit erfolgreich eingesetzt, z. B. für die Rückverfolgung von frischen Lebensmittelprodukten.

4. Pilotprojekt „Mehrwegbecher mit digitalem Produktpass“

Das Konzept von R-Cycle wird in zahlreichen Pilotprojekten erprobt und validiert. In einem Pilotprojekt hat Arburg eine smarte Turnkey- konzipiert, die vollautomatisch digitale Produktpässe generieren und kommunizieren kann. Produziert werden beispielhaft digitalbedruckte Mehrwegbecher im anspruchsvollem Design.

Das Herzstück der Fertigungszelle ist ein elektrischer Allrounder 370 A mit 600 kN Schließkraft und Gestica-Steuerung. Die Spritzgießmaschine ist serienmäßig „ready for digitalisation“, d.h. mit einer IIOT-Schnittstelle ausgestattet, welche umfangreiche Möglichkeiten der Kommunikation und des Datenaustausches bietet. Auf dieser Basis wird die Anbindung an bzw. die Kommunikation mit der R-Cycle Dateninfrastruktur realisiert. Die für den digitalen Produktpass benötigten Informationen werden während der Produktion gesammelt bzw. generiert. Die entsprechenden Daten werden aus den Maschinen- bzw. Auftragsdaten extrahiert, entsprechend der EPCIS-Definition aufbereitet und als Event an den R-Cycle Server kommuniziert.



Bild 2: Arburg Turnkeyanlage für nachhaltige Mehrwegbecher

Die gefertigten Becher werden mit einem vertikalen Robot-System aus dem Werkzeug entnommen, zunächst einer Plasmabehandlung und danach einer Digitaldruck-Station zugeführt. Somit ist die Produktveredelung direkt in die Fertigungszelle integriert. Jeder Becher wird mit einem auswählbaren Bildmotiv bedruckt. Zusätzlich werden innerhalb des Druckbilds zwei DM-Codes aufgedruckt, davon führt einer auftragsbezogen zum digitalen Produktpass. Durch Auslesen des Codes, entweder per Kamerasystem direkt in einer Sortieranlage oder mit einem mobilen Endgerät, können die genauen Materialdaten des Bechers identifiziert



werden. Mit diesem Konzept kann eine präzisere Sortierung von Kunststoffabfällen realisiert werden.

Bild 3: Mehrwegbecher mit Identifizierungsmöglichkeit

5. Ausbaubares Datenkonzept

Ein weiterer Anwendungsfall, bei dem der digitale Produktpass einen Mehrwert liefern kann, ist die Erfüllung (aufkommender) gesetzlicher Informationspflichten, wie z. B. bei der Berechnung des CO2-Fußabdrucks oder im Bereich der Extended Producer Responsibility (EPR). Auf diese Weise können zeitaufwändige manuelle Berechnungen automatisiert werden, um Anforderungen von Gesetzgebern oder Kunden zu erfüllen.

6. Zusammenfassung

Mit dem R-Cycle Konzept wird für Consumer-Produkte ein digitaler Produktpass generiert. Alle relevanten Informationen aus der Wertschöpfungskette werden transparent und automatisiert für alle Prozessbeteiligten nutzbar gemacht, mit dem Ziel, im Recyclingprozess mit Hilfe dieser Informationen ein hochwertiges Rezyklat generieren und in die Wertstoffkette rückführen zu können. Ein Pilotprojekt, ein Mehrwegbecher produziert auf einer Arburg Turnkey-Anlage, zeigt die Machbarkeit dieses Konzepts. Das steigert die Nachhaltigkeit und Effizienz, sowohl bei der Informationsbeschaffung als auch im gesamten Kreislauf von Kunststoffverpackungen bzw. Kunststoffprodukten.

- [1] *Conversio Studie 2017 (Stoffstromdiagramm Kunststoffe in Deutschland) / Plastikatlas Heinrich Böll Stiftung

VDI-Berichte 2385

ISBN 978-3-18-092385-7